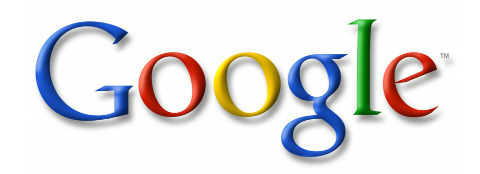


This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

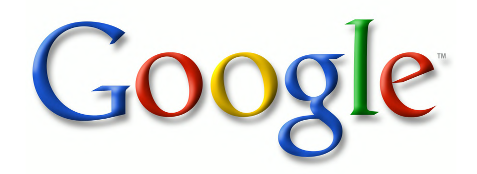
Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at http://books.google.com/



Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

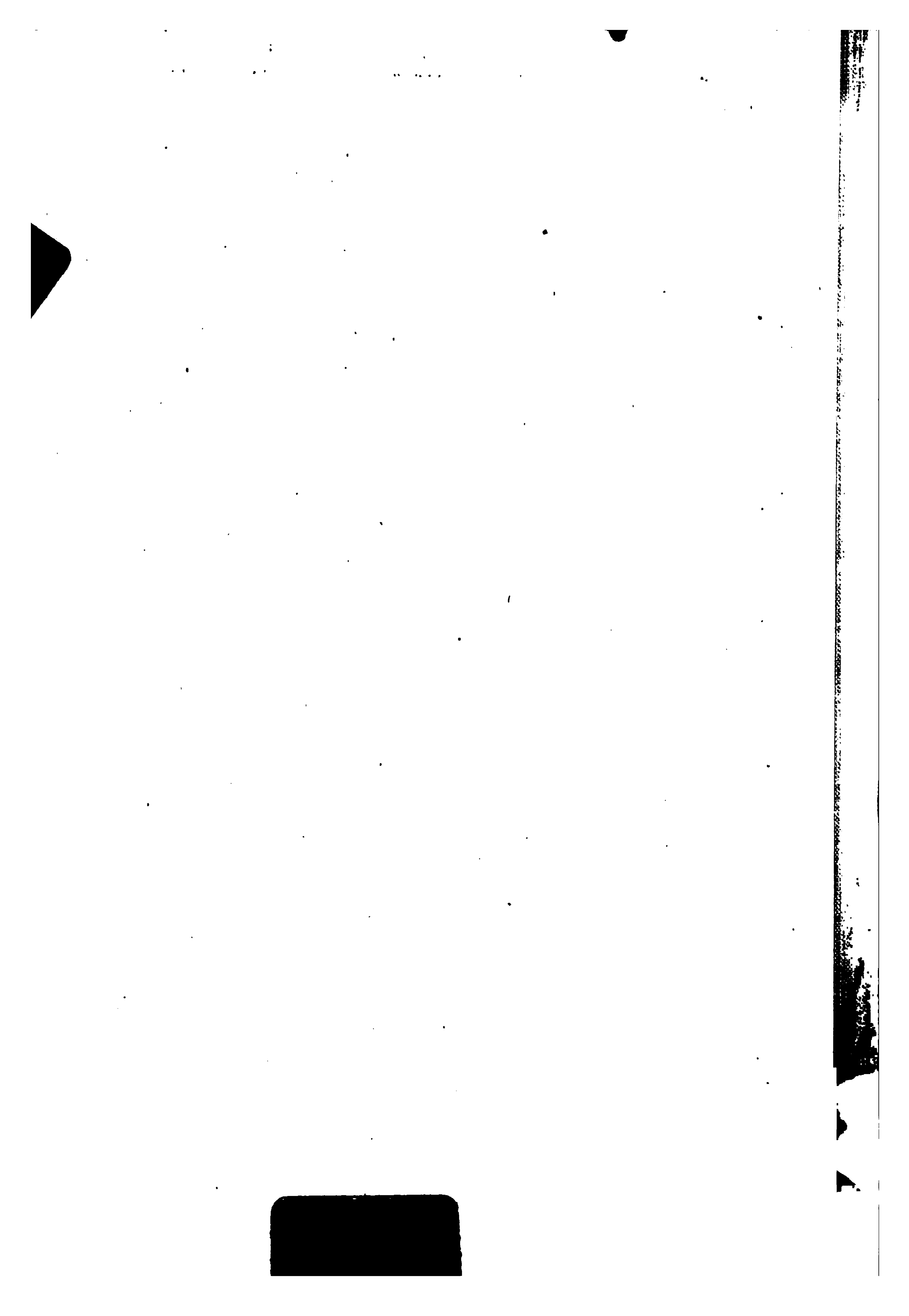
Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.
+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.
+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.
+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.





THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
416498
ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS
1903

3

Handbuch

der

Elektrotechnik

bearbeitet von

Dipl. Ingenieur **D. Bercovitz**, Berlin. — Professor Dr. **H. Ebert**, München. — Oberingenieur **V. Engelhardt**, Charlottenburg. — Ingenieur **H. Freytag**, Charlottenburg. — Kgl. Bayr. Ober-Regierungsrat Prof. Dr. **B. Gleichmann**, München. — Professor Dr. **C. Heinke**, München. — Direktor **R. O. Heinrich**, Berlin. — Oberingenieur Dr. Ing. **K. Hohage**, Berlin. — Postrat **O. Jentsch**, Erfurt. — Professor Dr. **J. Kollert**, Chemnitz. — Direktor **O. Krell**, Berlin. — Professor Dr. **F. Niethammer**, Brünn. — Geheimer Rechnungsrat **J. Noebels**, Vorsteher des Telegraphenbaubureaus des Reichs-Postamts, Berlin. — Regierungsbaumeister **Pforr**, Berlin. — Professor **Karl Pichelmayer**, Wien. — Oberingenieur **H. Pohl**, Berlin. — Professor Dr. Ing. **W. Reichel**, Charlottenburg. — Postrat **A. Schluckebier**, Kiel. — Oberingenieur **E. Schulz**, Saalfeld. — Regierungsbaumeister a. D. **H. Schwerin**, Charlottenburg. — Direktor Dr. **E. Sieg**, Cöln. — Ingenieur **B. Soschinski**, Berlin. — Professor **E. Veesenmeyer**, Stuttgart. — Ingenieur **Rud. Vogel**, Charlottenburg. — Direktor **K. Wilkens**, Berlin. — Ingenieur **R. Ziegenberg**, Berlin

herausgegeben von

Dr. C. Heinke,
Professor der Elektrotechnik an der technischen Hochschule in München.

Zweiter Band:
Die Messtechnik.

Vierte bis sechste Abteilung

bearbeitet von

Dr. C. Heinke, R. O. Heinrich, D. Bercovitz und **R. Ziegenberg.**

Leipzig
Verlag von S. Hirzel
1908.

Die Messtechnik

von

Dr. C. Heinke, Dr. J. Kollert, Dir. R. O. Heinrich, D. Bercovitz

und

R. Ziegenberg.

Vierte Abteilung:

Wechselstrommessungen, Wellenstrommessungen und magnetische Messungen

von

Dr. C. Heinke.

Mit 285 Abbildungen.

Fünfte Abteilung:

Die technischen Messinstrumente

von

R. O. Heinrich und **D. Bercovitz.**

Mit 91 Abbildungen und 1 Tafel.

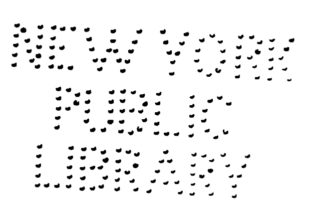
Sechste Abteilung:

Die Electrizitätszähler

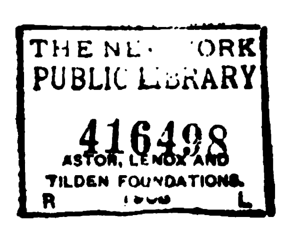
von

R. Ziegenberg.

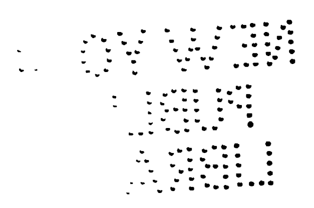
Mit 190 Abbildungen.


NEW YORK PUBLIC LIBRARY

Leipzig
Verlag von S. Hirzel
1908.



Das Recht der Übersetzung ist vorbehalten.



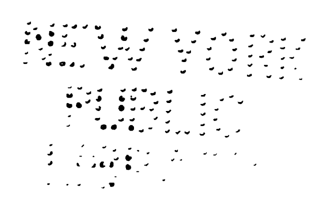
Vierte Abteilung.

Wechselstrommessungen, Wellenstrommessungen und magnetische Messungen

bearbeitet

von

Dr. C. Heinke.



Vorwort zur vierten Abteilung.

Die vierte Abteilung des Bandes „Meßtechnik“ umfaßt Wechselstrommessungen, Wellenstrommessungen und magnetische Messungen. Die Begründung für die Behandlung der Wellenstrommessungen in einem besonderen Abschnitt ist in der Einleitung zu diesem Abschnitt gegeben.

Das Schwergewicht dieser vierten Abteilung liegt in der Behandlung der Meßmethoden und Meßanordnungen, da die Instrumente und Einzelapparate der Hauptsache nach an anderen Stellen des Bandes II besprochen sind. Im allgemeinen waren bei der Bearbeitung die bereits im ersten Bande angeführten Gesichtspunkte maßgebend; auch hier wurde besonderes Gewicht darauf gelegt, die einzelnen Meßmethoden nicht beliebig hintereinander, sondern in einem inneren Zusammenhang aufzuführen und diesen, soweit angängig, organisch zu entwickeln, ein Versuch, den namentlich die einleitenden Artikel und die Übergangsbetrachtungen an einigen Stellen dieser Abteilung unterstützen sollen. Dies machte gleichzeitig eine Sichtung und Auswahl des vorhandenen umfangreichen Stoffes notwendig.

Für diese Auswahl und Anordnung der Methoden war, abgesehen von den Rücksichten auf die Raumbeschränkung, aber noch ein weiterer Gesichtspunkt maßgebend, der noch mit einigen Worten berührt werden möge, da er gegenüber dem ersten Band, der die physikalischen Grundlagen umfaßt, bei der Meßtechnik, als der Überleitung zu den rein technischen Gebieten der folgenden Bände, stärker hervortritt.

Aus der Elektrophysik entspringend hat dieser Zweig der angewandten Physik sich in der Vereinigung mit dem Maschinenbau zu der jetzt deutlich abgegrenzten Elektrotechnik entwickelt, ein Werdegang, der im wesentlichen als vollendet angesehen werden kann. Auf dem Zwischengebiet, das der Physik und der Elektrotechnik gemeinsam ist, vollzieht sich als Folgewirkung eine immer weiter vorschreitende Trennung im Sinne der Entwickelung einer sich immer deutlicher abgrenzenden „technischen“ Wissenschaft. Dies gilt mehr oder weniger für alle in den letzten Jahrzehnten entstandenen technischen Sondergebiete und erstreckt sich auf unserem Gebiet, wie Bd. I erkennen ließ, bereits auf die elektrophysikalischen Grundlagen, in noch höherem Grade aber auf das Gebiet der Meßtechnik.

Unter Hinweis auf die Ausführungen über die Hilfsvorstellungen im ersten Band sei zunächst nochmals betont, wie wichtig es gerade für die

technische Wissenschaft ist, den Unterschied zwischen Erfahrungstatsachen und Wirklichkeitsbeziehungen einerseits, gedanklichen Vorstellungen und Annahmen andererseits stets im Auge zu behalten. Des weiteren muß sie zwischen gedanklichen Vorstellungen oder Annahmen und dem durch beide angestrebten Ziel oder Zweck scharf unterscheiden. Die Aufgabe der gedanklichen Vorstellungen (Hilfsvorstellungen) ist es, für ein mechanisch nicht greifbares Geschehen oder Tatsachengebiet ein (mechanisch) greifbares und bereits gedanklich verarbeitetes Tatsachengebiet zu einer Analogievorstellung zu verwerten, welche in möglichst weiten Grenzen parallel läuft bzw. konform ist mit dem nicht direkt wahrnehmbaren Tatsachengebiet.

Weiterhin ist bei jenen Annahmen stets darauf hinzuweisen, welcher der beiden folgenden Klassen sie angehören: Die Annahmen können entweder derart sein, daß sie von materiell wesentlichen Momenten absehen, z. B. von der Reibung. Derartige Annahmen sind streng genommen mit den Tatsachen nicht vereinbar und meist nur innerhalb ganz beschränkter Grenzen als angenäherte Beschreibung des Geschehens zulässig. Trotzdem können sie für die Theorie und den Lernenden einen beträchtlichen Wert besitzen, insofern sie zur Erleichterung der Übersicht, Einübung begrifflicher Verknüpfungen u. dergl. geeignet sind. Nur beim gedanklichen Übergang zur Wirklichkeit dürfen jene Abstraktionsgrenzen keinesfalls übersehen werden, weil ein technischer Unsinn sonst die unausbleibliche Folge ist.

Die zweite Klasse von Annahmen erstreckt sich auf bestimmte Verhältnisse, Materialkoeffizienten, kurzweg Größenannahmen für alle praktisch wesentlichen Momente. Hierbei ist auf die Möglichkeit des Nebeneinander bei demselben Substrat achtzugeben und für den Fall einer konstruktiven Verwertung (Vorrichtung für praktische Verwendung) auf möglichste Anpassung der Materialkoeffizienten an die Wirklichkeit mit Hilfe von Messungen, da die Güte der Lösung des vorgesetzten Problems hiervon abhängt.

In der Technik dienen alle diese gedanklichen Zwischenglieder und Hilfsoperationen dazu, die geistige Hindurchführung vom ungewollten, gleichsam ungerichteten Geschehen zu dem im Sinne des Menschen gerichteten Geschehen möglichst zwangläufig und fehlerfrei zu bewerkstelligen, außerdem aber auch noch — und dies bildet für die Industrie und somit für die technische Wissenschaft, gegenüber der reinen, ein äußerst wichtiges Moment — auf einem möglichst wirtschaftlichen Wege. Aus diesem Grunde wird die technische Wissenschaft neben der Gedankenökonomie der allgemeinen Wissenschaft noch die Ausbildung einer ihr eigentümlichen Wirtschaftlichkeit anstreben. Diese wird sich auf Darstellungsweise, Rechnungsverfahren, praktisch zulässige Vereinfachungs- und Annäherungsmethoden u. dergl. beziehen.

Die Ausbildung solcher praktisch wichtiger, gedankenökonomischer oder überhaupt allgemein wirtschaftlicher Verfahrungsarten wird das eigentümliche und neue Moment in der Wissenschafts-Abzweigung oder auch Wissenschafts-Wertung bilden, die man als „technische" bezeichnen könnte. In letzterer werden gegenüber der sog. reinen Wissenschaft oft beträchtliche Verschiebungen eintreten, insofern der relative Wert ausgedehnter theoretischer Spekulationen, oder — auf dem Gebiet der Meßtechnik — sehr zeitraubender, umständlicher Verfahren stark zusammenschrumpft, hingegen andere grundlegende Beziehungen mit ihren praktisch wichtigen Variationen,

ebenso technische Vorstellungsweisen bzw. Meßverfahren eine besondere Betonung und Ausdehnung erfahren.

Solche Überlegungen ergaben dem Verfasser die Annahme für die gegenwärtige Entwickelungsrichtung in der elektrischen Meßtechnik und weiterhin die Grundlage für die getroffene Auswahl und Anordnung der Meßmethoden.

Nicht berücksichtigt wurden in diesem Bande die speziell für die drahtlose Telegraphie usw. verwendeten Apparate und Methoden, soweit sie in Bd. XII Behandlung gefunden haben.

Für die Figuren konnten, namentlich soweit Apparate in Frage kamen, mehrfach bereits vorhandene Bildstöcke benutzt werden. So sind die Abbildungen 18, 83, 84, 93, 94 der ETZ, 85a, 88, 251, 252 der Zeitschrift für Instrumentenkunde, 243, 259, 260, 261, 264, 274 dem Buche von Du Bois über „Magnetische Kreise", 62, 229, 230 den Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes, 106 dem Journal L'Eclairage électrique und 178, 193—195, 197—202 der Zeitschrift Glückauf entnommen. Ebenso stellten mehrere Fabriken elektrischer Meßinstrumente die benötigten Bildstöcke freundlichst zur Verfügung.

Neben dem Dank an die Firmen, welche Bildstöcke für eine Anzahl von Abbildungen dieser Abteilung überlassen haben, sowie namentlich auch an die Verlagsfirma für das Entgegenkommen, welches mir bei der Drucklegung aller von mir verfaßten Handbuchabschnitte nach jeder Richtung hin bewiesen wurde, habe ich noch meinem ersten Assistenten, Herrn Diplomingenieur G. Hommel, besonders zu danken für seine Unterstützung bei der Herstellung der Figurenvorlagen und beim Lesen der Korrektur.

Irschenhausen bei München, im Oktober 1906.

Dr. C. Heinke.

Inhaltsverzeichnis.

Wechselstrommessungen.

Einleitung.

I. Einzelgrößen.

A. Wechselspannungen.

B. Wechselstromstärken.

C. Wechselstromwiderstände und Wechselstromkoeffizienten.

a) Wechselstromwiderstände.

b) Selbstinduktionskoeffizienten.

α) Allgemeines und Messung ohne Vergleichsnormale.

β) Vergleichsmethoden.

Seite

II. Ermittelung des erzielten magnetischen Ausgleichs.

1. Zusammenstellung der verschiedenen Mefsmöglichkeiten.

2. Magnetometermethoden und magnetische Brücken.

3. Elektromotormethoden.

4. Zugkraftsmethoden.

5. Methoden mit Benutzung der magnetoelektrischen Widerstandsänderung.

6. Induktionsmethoden.

a) Gleichsinnige Induktion mit Schwingungs-Galvanometer.

b) Wechselnde Induktion mit Voltmeter.

III. Ermittelung der magnetischen Widerstandsgröfse und des magnetischen Materialkoeffizienten μ.

1. Der magnetische Widerstand und seine Messung.

2. Aufstellung von B, H-Kurven und μ-Kurven.

B. Magnetische Verlustgröfsen.

I. Punktweise Ermittelung von Hystereseschleifen.

II. Messung und Vergleichung dynamischer Hysteresewerte.

1. Die Gewinnung dynamischer Hystereseschleifen.

2. Vergleich der Hysteresewerte von Eisenblechen.

III. Verlustgröfsen bei technischem Wechselstrom.

C. Dauermagnete.

Zusammenstellung der in Hdb. II, 4 gebrauchten Symbole und ihrer Bedeutung.

(Die beigefügten Zahlen verweisen für die nähere Erläuterung auf die Artikelnummer.)

A = Hysteresearbeit (163).
α = Galvanometer- oder Wattmeterausschlag.
B = spezifische magnetische Induktion (Kraftlinien auf 1 cm^2).
B' = maximale Induktion bei Wechselmagnetisierung $\tilde{B}$.
B_f = magnetische Induktion des Ferrikums (163).
B_0 = magnetische Induktion der Luft.
B, H-Kurve = graphische Darstellung der Beziehung zwischen B und H (157).
β = Wirbelstromkoeffizient (171).
C = Kapazität einer Leiteranordnung (31).
C_b = ballistische Konstante eines Schwingungsgalvanometers (27).
C_i = Stromkonstante eines Schwingungsgalvanometers (27).
C_p = Polarisationskapazität (9).
C_r = resultierende Kapazität (36).
c_e = Kurvenfaktor der Spannungswelle.
c_i = Kurvenfaktor der Stromwelle (15).
γ = Entmagnetisierungsfaktor (160); Gefäßfaktor, Widerstandskapazität (12).
D = Druckdifferenz im magnetischen Ausgleichgesetz $N = D : S_m$ (126); Drehmoment in $kg \times m$.
d = Entfernung, Abstand, Durchmesser.
Δ = Spannungserhöhung elektr. Maschinen bei Entlastung (82).
δ = Phasenverschiebung zweier Spannungen (16, 64).
E = elektr. Spannung (allgemein).
$\overline{E}$ = „ Gleichspannung.
$\tilde{E}$ = „ Wechselspannung (effektiver Mittelwert).
$\underset{w}{E}$ = Wellenspannung (114).
$\underset{w}{E_g}$ = Gleichspannungsniveau einer Wellenspannung (117).
$\underset{w}{E_\sim}$ = Wechselkomponente (äquival. Effektivwert) einer Wellenspannung (117).
$\tilde{E}_0$ = EMK von Wechselstromerzeugern (79).
$\tilde{E}_k$ = Klemmenspannung bei Wechselstromerzeugern (78).
$\overline{E}_p$ = Polarisationsspannung (9).
$\tilde{E}_R$ = Spannungskomponente zur Überwindung des elektromagnetischen Reibungswiderstandes (OHMschen Widerstandes).

$\tilde{E}_L$ = Spannungskomponente zur Überwindung des elektromagnetischen Trägheitswiderstandes (Selbstinduktion).
$\tilde{E}_C$ = Spannungskomponente zur Überwindung des elastischen Widerstandes (des Dielektrikums).
E_g = Summen- bzw. Generatorspannung.
$\tilde{E}_\mu$ = umgesetzte Spannungskomponente, welche durch magnetisches Wechselfeld kompensiert wird.
e = Augenblickswert der Spannung; als Index bedeutet es: in Beziehung auf die Spannung z. B. ω_e.
e' = Maximalwert bei periodischer Wechselspannung.
ε = Spannungsabfall bei Maschinen (81).
F = Korrektionsfaktor bei Wattmetern (64).
f = Formfaktor einer Wechselstrom- oder Spannungskurve (59).
φ = Phasenverschiebungswinkel (zwischen Spannung und Stromstärke) im Kreisdiagramm.
g als Index eines einfachen Symbols z. B. J_g deutet eine Summen- bzw. Generatorgröße an.
g als Index einer Wellenstromgröße z. B. $\overset{w}{J}_g$ deutet das Gleichstromniveau an (117).
H = magnetisches Gefälle oder spezifische magnetische Antriebskraft (Druckdifferenz), auch „Feldstärke" (127).
h = Materialkoeffizient der Hysterese nach STEINMETZ (sonst mit η bezeichnet) (163).
J = elektrische Stromstärke (allgemein).
$\bar{J}$ = elektrische Gleichstromstärke.
$\tilde{J}$ = elektrische Wechselstromstärke.
$\overset{w}{J}$ = elektrische Wellenstromstärke (112).
J = Höhe des Gleichstromniveaus der Wellenstromstärke (117).
$\overset{w}{J}_\sim$ = Wechselkomponente der Wellenstromstärke (Effektivwert) (117).
$\bar{J}_\mu$ = Erregerstromstärke bei Dynamos (78).
$\tilde{J}_\mu$ = Magnetisierungskomponente (169).
$\tilde{J}_{h+w}$ = Wattkomponente des Magnetisierungsstroms (169).
$\tilde{J}_k$ = Kurzschlußstrom (84).
i = Augenblickswert der Stromstärke; als Index bedeutet es: in Beziehung auf Stromstärke z. B. ω_i.
i' = Maximalwert einer periodischen Stromstärkekurve.
I = Magnetisierungsintensität (164).
k = Leitfähigkeit oder spezifisches Leitungsvermögen in $\Omega \left(\frac{m}{mm^2}\right)$ als Materialkoeffizient der Leitung (12).
k = Dämpfungsverhältnis von Galvanometern (144).
k mit Index, z. B. k_1 oder k_2 = Wickelungsfaktoren (104).
L = Selbstinduktionskoeffizient einer Leiteranordnung.
L_1 = Selbstinduktionskoeffizient einer Leiteranordnung bei eisenfreier Umgebung (11).
L_μ = ideeller oder reiner Selbstinduktionskoeffizient (14).
L_w oder $\tilde{L}$ = wirksamer Selbstinduktionskoeffizient (14).
l = Länge (eines Leiters, bzw. Kraftlinienweges).
ln = log. nat.

λ = Korrektionsglied bei schwingenden Federn (41); $\ln k$ beim Dämpfungsfaktor
M = Wechselinduktionskoeffizient (26).
M_μ = ideeller Wechselinduktionskoeffizient (26).
M_w = wirksamer Wechselinduktionskoeffizient (26).
$m = \frac{z \cdot 60}{n}$ = Verhältnis der Wechselzahl zur sekundlichen Umdrehungszahl (41).
m als Index einer Klammergröße z. B. $(\mu)_m$ oder $(b)_m$ bezeichnet den mittleren Wert im Querschnitt.
μ = magnetische Permeabilität.
μ als Index bedeutet: auf Magnetisierung bezüglich z. B. $\tilde{J}_\mu$.
μ_g = mittlere Permeabilität eines gemischten Kreislaufes (11).
$\tilde{\mu}$ = Wechselstrompermeabilität.
$\bar{\mu}$ = Gleichstrompermeabilität.
N = magnetisches Kraftlinienfeld (allgemein).
$\bar{N}$ = magnetisches Gleichfeld.
$\tilde{N}$ = magnetisches Wechselfeld.
n = Umdrehungszahl pro Minute.
n = Schwingungszahl eines Galvanometers (144).
ν = magnetischer Streuungskoeffizient (149).
$\omega = \pi \cdot z = 2\pi u$ = Polargeschwindigkeit bei Sinusfunktionen.
$\omega_e = \frac{d\alpha_e}{dt} = c_e \cdot z$ = Polargeschwindigkeit der Wechselspannung bei beliebiger Kurvenform (44).
$\omega_i = \frac{d\alpha_i}{dt} = c_i \cdot z$ = Polargeschwindigkeit der Wechselstromstärke bei beliebiger Kurvenform (45).
p = Zahl der Polpaare bei Dynamos (41).
Q = Elektrizitätsmenge (elektrische Ladung) (31).
q = Augenblickswert einer Ladung.
q = Querschnitt eines Leiters (Kraftlinienweges).
$\bar{R} = \frac{l}{q \cdot k}$ = (totaler) elektrischer Widerstand einer Leiterstrecke nach OHM (Gleichstromwiderstand).
$\tilde{R}$ = wirksamer Reibungswiderstand bei Wechselstrom (13).
$R_d = \tilde{R} - \bar{R}$ = Differenz zwischen Gleichstrom und Wechselstrom-Reibungswiderstand (13), auch Verlustwiderstand genannt.
S mit Index z. B. S_1, S_2 = Anzahl der induzierten Drähte bei elektrischen Maschinen (49).
$S_m = \frac{l}{q \cdot \mu}$ = magnetischer Widerstand (einer Kraftlinienbahn) (163).
σ = prozentuale Schlüpfung bei Asynchronmotoren (46).
$T = \frac{1}{u} = \frac{2}{z} = \frac{2\pi}{\omega}$ = Zeitdauer einer Periode (Vollschwingung).
T = Trägheitsmoment eines schwingenden Systems (52).
T = Übertemperatur elektr. Maschinen bei Dauerbetrieb (90).
$\tau = \frac{T}{2}$ = Zeitdauer einer einfachen (Halb-)Schwingung (52).
u mit Index z. B. u_1, u_2 = Umdrehungszahlen (46).

$u = \frac{z}{2}$ = sekundliche Periodenzahl oder Frequenz.
v = mechanische Geschwindigkeit.
W = umgesetzte elektrische Leistung in Watt.
$\tilde{W}$ = Wechselstromleistung.
$\dot{W}$ = Drehstromleistung (70).
$\overset{w}{W}$ = Wellenstromleistung (mittlere) (117).
W_v = Leistung zur Deckung der Verluste in elektr. Maschinen (86).
w über einem Symbol deutet den Wellenstromcharakter einer Größe an.
w als Index deutet eine wirksame Größe bei Wechselstrom an (14); in 169 bezieht es sich auf Wirbelstromgrößen.
w = Windungszahl.
η = Wirkungsgrad elektrischer Maschinen (86).
Z = Ausgleichwiderstand (in scheinbaren Ohm) bei Wechselstrom.
Z = magnetische Zugkraft (139).
$z = 2u$ = sekundliche Wechselzahl (40).
$\sim$ = Zeichen für Wechselstromcharakter.

Abkürzungen in Hdb. II, 4.

AW = Ampere-Windungen.
EMK = elektromotorische Kraft.
MMK = magnetomotorische Kraft.
Mf = Mikrofarad.
Mh = Millihenry.
Ω = Ohm.
Ω_s = scheinbare Ohm.
PS = Pferdestärke.
KW = Kilowatt.
S.J.K. = Selbstinduktionskoeffizient (im Register).
W.J.K. = Wechselinduktionskoeffizient (im Register).
V.D.E. = Verband Deutscher Elektrotechniker.

Abkürzungen bei Zitaten.

ETZ = Elektrotechnische Zeitschrift (Berlin bei J. Springer) mit Jahreszahl u. Seite.
Ph.Z. = Physikalische Zeitschrift (Leipzig bei S. Hirzel) mit Jahrgangsnummer u. Seite.
Hdb. II, 1 in 25 = Handbuch der Elektrotechnik (Leipzig bei S. Hirzel) mit Bandzahl und Abteilung sowie Angabe der Artikelnummer. Die Verweise innerhalb Hdb. II, 4 sind ohne Angabe des Bandes einfach durch eingeklammerte fette Ziffern erfolgt.
W.A. 66, 500 = Wiedemanns Annalen, Band 66, Seite 500 (Leipzig bei A. Barth).
Ann. d. Ph. 10, 892 = Annalen der Physik, Band 10, Seite 892 (Leipzig bei A. Barth).
Verh. d. V. z. B. d. G. = Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbfleißes
Z. f. I. = Zeitschrift für Instrumentenkunde (Berlin bei J. Springer).
a. a. O. = am angeführten Orte (mit Bezug auf das letzte Zitat).

Druckfehlerberichtigung.

In der ersten Abteilung von Bd. II auf Seite 157 fehlt bei Fig. 116 die Verbindung zwischen den beiden Klötzen, welche mit L bzw. S_p bezeichnet sind.

Wechselstrommessungen.

Einleitung.

Im Anschluß an die für den ganzen Band gewählte Haupteinteilung sollen in erster Linie und ausführlicher die verschiedenen Meßschaltungen und Methoden zur Ermittelung der Einzelgrößen behandelt werden. Hieran schließen sich die hauptsächlichen Verfahren zur Aufstellung des Zusammenhangs der Einzelgrößen — in graphischer Darstellung bei den Maschinen meist als Charakteristik bezeichnet — soweit sie nicht schon in Bd. II, 1 behandelt wurden.

1. Einteilung und Allgemeines.

Bei den Wechselspannungen und Wechselstromstärken wäre eigentlich eine Einteilung nach drei Richtungen möglich, nämlich in die Messung der praktisch zunächst wichtigen Effektivwerte (wirksame Mittelwerte siehe I, 1 in **100**), die Feststellung der Kurvenform einschließlich des Scheitelwertes und die Ermittelung der sekundlichen Periodenzahl oder der Wechselzahl. Die beiden letzten Erscheinungsseiten sind aber bei den Spannungen und Stromstärken meßtechnisch einander so nahestehend, daß zur Vermeidung von Wiederholungen es besser erscheint unter Wechselspannung bzw. -Stromstärke zunächst nur die verschiedenen Verfahren zur Erlangung der Effektivwerte, die Bestimmungen der Wechselzahlen und Kurvenformen hingegen gesondert zu behandeln.

Da weiterhin die direktzeigenden (technischen) Spannungs- und Stromzeiger noch eine eingehende Behandlung in diesem Bande erfahren, so wird hier nur auf das Eichverfahren kurz zu verweisen sein, soweit die bequemeren mittleren Meßbereiche der direktzeigenden Instrumente in Betracht kommen. Etwas eingehendere Betrachtung werden hingegen die Laboratoriumsmethoden verlangen, welche sich auf die beiderseits anschließenden, weniger gut meßbaren Bereiche erstrecken. Es ist bei den Wechselstromgrößen nämlich als besonders charakteristisch gegenüber den Gleichstrommessungen zu beachten, daß die quadratische Wirkungsweise der Wechselstrommeßinstrumente (Hdb. II, 1 in **20 ff.**) dem bequem meßbaren Bereich praktisch weit engere Grenzen zieht, so daß man nicht nur viel früher auf Schwierigkeiten für eine direkte Messung stößt, sondern auch überhaupt die vorläufigen Schranken der Meßtechnik viel früher erreicht, namentlich bei gleicher prozentualer Zuverlässig-

keit des Meßergebnisses. Während man z. B. bei Gleichstrom mit Laboratoriumsinstrumenten ohne erhebliche Schwierigkeiten bis herunter zu 10^{-9} Amp. und etwa 10^{-6} Volt messen kann, mit direkt zeigenden bis etwa 10^{-3} Volt, bieten bei Wechselstrom die Meßbereiche schon abwärts von etwa 10^{-2} Amp. und 1 Volt erhebliche Schwierigkeiten.

Diese praktische Beschränkung im Meßbereich, welche sich auf alle Wechselstrommessungen ausdehnt und in der Eigenart der Wirkungsweise der Wechselstrommeßinstrumente begründet ist, darf von vornherein nicht aus dem Auge verloren werden. Sie bildet auch die Ursache für die Dreiteilung der Meßmethoden bei jeder Hauptgröße, je nachdem es sich um den praktisch, oder auch für direktzeigende Meßinstrumente am besten zugänglichen Meßbereich handelt, oder um Werte, welche unterhalb, oder um solche, welche oberhalb der Grenze liegen, die als natürlich für die bequemsten (üblichen) Meßverfahren gelten kann.

I. Einzelgröfsen.

A. Wechselspannungen.

2. Mittlere Spannungen. Eichung der Voltmeter.

Geht man wiederum von der Ursache für alle Wechselstromerscheinungen, der symmetrischen Wechselspannung (I, 1 in **100**) aus, und stellt sich zunächst die Aufgabe, ihren praktisch wichtigsten Mittelwert $\tilde{E} = \sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} e^2 dt}$ zu messen, so wird man sich bei den Werten, die das Gebiet der Niederspannung umfassen und so ganz ungefähr zwischen 20 bis 30 Volt und 250 Volt liegen, fast ausnahmslos eines der direktzeigenden Instrumente entweder nach dem Hitzdrahtprinzip (II, 1 in **20**) oder mit magnetischer Feldwirkung nach Klasse 2 bis 4 (II, 1 in **22**) bedienen, seltener eines elektrostatischen Instrumentes (Multicellularvoltmeter). Bei den Hitzdrahtinstrumenten genügt eine voraufgegangene sorgfältige Eichung mit Gleichspannung. Diese kann z. B. in der Schaltung nach Fig. 1 erfolgen, wobei als Spannungsquelle am besten eine Akkumulatorenbatterie B benutzt wird und von den beiden parallel geschalteten Voltmetern etwa H.V. das zu eichende Hitzdrahtvoltmeter bezeichnet, während als Normalinstrument N.V. etwa ein zuverlässiges Drehspuleninstrument (Weston-Voltmeter) mit genau bekannten Korrektionen gedacht ist. Anstelle dieses kann im Laboratorium auch ein Kompensationsapparat benutzt werden (II, 1 in **169 ff.**). Die Schaltung von Fig. 1, bei welcher der zur Spannungsteilung benutzte Widerstand teilweise parallel zu den Voltmetern geschaltet ist, setzt eigentlich voraus, daß dieser Widerstand kleiner ist als der resultierende Widerstand der beiden parallelgeschalteten Voltmeter, anderenfalls wird zur Erzielung der Abstufungen bei den höheren Skalenwerten besser eine Umschaltung durch Öffnen des Schlüssels S vorgenommen, durch welche der regulierbare Widerstand V als Vorschaltwiderstand wirksam wird.

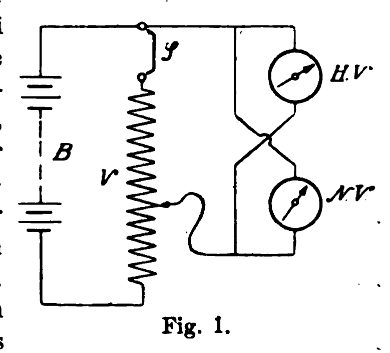


Fig. 1.

Zu beachten ist noch, daß das Wechselstromvoltmeter H.V. in der gleichen Lage geeicht wird, in der es benutzt werden soll, damit nicht durch Änderung einer stillschweigend als konstant vorausgesetzten Zustands-

bedingung erhebliche Fehler entstehen. Dies zeigt sich besonders deutlich bei den (älteren) langdrahtigen Hitzdrahtinstrumenten, die in vertikaler Lage um etwa 10% empfindlicher, doch auch gleichzeitig viel unruhiger zeigen als in horizontaler Lage infolge der Änderung der Wärmeabführungsverhältnisse (II, 1 in **20**).

Bei den Spannungsmessern, welche auf elektrischer Feldwirkung beruhen (elektrostatischen Voltmetern vgl. II, 1 in **99 ff.**), wäre nach der einfachen Theorie gleichfalls kein Unterschied der Angaben zwischen Gleich- und Wechselspannungen bei gleichem Effektivwert zu erwarten, eine Eichung derselben mit Gleichspannung zwecks nachheriger Verwendung derselben Eichkurve für Wechselspannungsmessungen daher ohne weiteres zulässig. In Wirklichkeit erleidet dies aber nach zwei Richtungen eine Einschränkung. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Ausschlag und effektivem Spannungswert ist zunächst nur für metallisch gut geschlossene Typen gegeben, bei denen ausgedehntere Flächen von Glas oder ähnlichen Isoliermaterialien mit Halbleitung in der Nähe des beweglichen (Nadel-) Systems vermieden sind. Bei allen übrigen Apparaten, namentlich solchen mit Glasgehäusen oder Deckeln, welche je nach der Ausschlaggröße einen verschiedenen Verlauf der elektrischen Induktionslinien auf ihrem Wege: Nadel — Glas — feststehende Metallbelegung bzw. Gehäuse verursachen, ist Vorsicht am Platze, da hier Abweichungen zwischen der Gleichstromeichung und der Wechselstromeichung von verschiedener Periodenzahl bis zu mehreren Prozenten auftreten können, wenn als Zwischennormale für beide Eichungen ein Hitzdrahtvoltmeter, wie weiter unten angegeben, benutzt wird. Eine Überprüfung der elektrostatischen Voltmeter nach dieser Richtung ist jedenfalls erforderlich, wenn auch bei einigen marktgängigen Typen, z. B. den Multicellularvoltmetern nach W. Thomson diese Unterschiede nahezu auf Null gebracht sind. Bei anderen Apparaten, besonders den gewöhnlichen Blattelektroskopen, ist aber der Unterschied sehr beträchtlich und tritt namentlich zwischen Gleichspannung und Wechselspannung mit niederen (technischen) Wechselzahlen auf, während er zwischen letzterem und hohen Wechselzahlen, z. B. Lichtbogenwechselstrom, unbedeutend ist. Der Grund liegt in einer von der Zeit abhängigen Halbleitung des dielektrischen Mediums (meist des Glases) innerhalb des Weges der wirksamen elektrischen Induktionslinien des Feldes. Näheres hierüber geben Untersuchungen von H. Fischer (1906 Ph. Z. VII, 376; vgl. hierzu auch Benischke Ph. Z. VII, 525).

Weiterhin ist bei allen Elektrometern und allen anderen dreiteiligen elektrostatischen Spannungszeigern der Einfluß des Wechselpotentiales oder des Erdungspunktes auf die Ausschlaggröße zu beachten. Neuere elektrometrische Untersuchungen (siehe E. Orlich, Z. f. J. 1903 Heft 4) lassen erkennen, daß dieser Punkt nicht nur bei allen Gleichspannungsschaltungen sehr zu beachten ist und das Arbeiten mit dem Elektrometer recht subtil und umständlich macht, sondern daß auch bei der für Wechselspannungsmessungen zunächst allein in Frage kommenden sog. idiostatischen Schaltung — Verbindung der Nadel mit einem Quadrantenpaar — stets wenigstens zwei Ablesungen mit Kommutierung erforderlich sind, um Fehler nach dieser Richtung zu vermeiden, wenn auch die sonst unbedingt notwendige Anwendung von 2 bzw. 3 Kommutatoren sich hier etwas vereinfacht, wie Fig. 2a zeigt, welche die Schaltung der Eichung eines für Wechselspannungsmessungen geschalteten Elektrometers mit Hilfe von Gleichspannung $\overline{E}$ an-

gibt. Die aus der Batteriespannung $\overline{E}_B$ mit Hilfe von Spannungsteilung (4) gewonnene Eichspannung $\overline{E} = \overline{E}_B \cdot \frac{R_1}{R}$ wird an den Kommutator II gelegt, während die unter sich verbundenen Klemmen für Gehäuse G (NB. aus Metall!) und Nadel N abwechselnd mit dem einen oder anderen Quadrantenpaar (Q_1 oder Q_2) verbunden werden. Sind so durch Kommutieren von II und III 4 Ablesungen erhalten und wie a. a. O. angegeben die von ORLICH mit $(a_2—a_1)$ und $\mathfrak{B}$ bezeichneten Elektrometerkonstanten bestimmt, so gestattet jetzt der Ersatz von $\overline{E}$ in Fig. 2a durch die zu messende Wechsel-

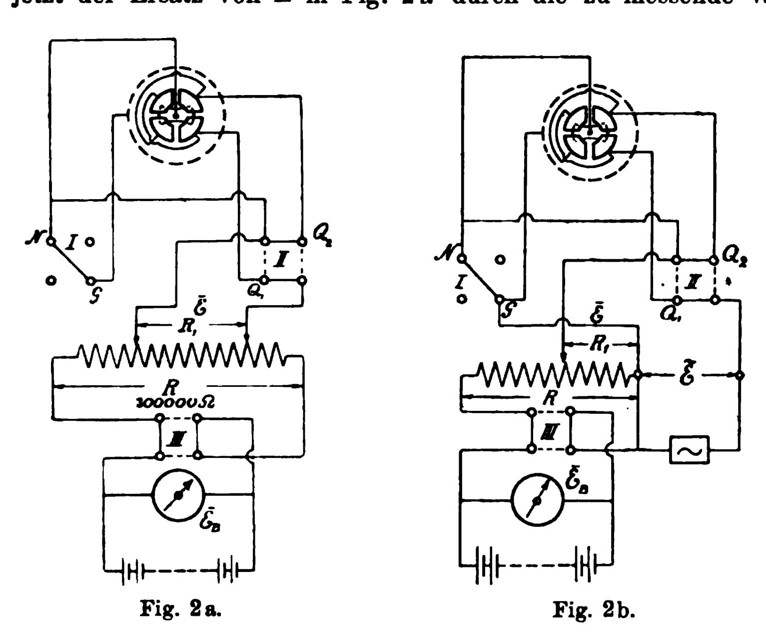


Fig. 2a. Fig. 2b.

spannung $\tilde{E}$ eine Messung von $\tilde{E}$ aus der Ausschlagsdifferenz $(\alpha—\delta)$, d. i. Summe der Ausschläge rechts und links bei den beiden Kommutatorstellungen von II nach der Gleichung

$$\alpha—\delta = \frac{(a_2—a_1)\,\tilde{E}^2}{1+\mathfrak{B}\,\tilde{E}^2}.$$

Die etwas umständliche Bestimmung der Elektrometerkonstanten kann man nach DREWELL (a. a. O. Seite 111) ganz vermeiden und durch zwei Gleichspannungsmessungen $\overline{E}_1$ und $\overline{E}_2$ ersetzen, wenn man die in Fig. 2b angegebene Differentialmethode bzw. -schaltung benutzt zur unmittelbaren Vergleichung von $\tilde{E}$ mit $\overline{E}$ nach der Gleichung

$$\tilde{E}^2 = \overline{E}_1 \cdot \overline{E}_2.$$

Man verfährt hierbei wie folgt: Die Teilspannung $\overline{E}$ wird so lange verändert bis das Elektrometer beim Kommutieren von II keinen Ausschlag mehr zeigt und ihr Wert $\overline{E}_1$ aus den Widerstandswerten und $\overline{E}_B$ zu $\overline{E}_B \cdot \frac{R_1}{R}$ gerechnet. Hierauf wird III kommutiert und $\overline{E}_2$ in gleicher Weise bestimmt.

Alle übrigen Wechselstromvoltmeter, deren Wickelungen merkliche Werte an Selbstinduktion besitzen, dürfen im allgemeinen nicht mit Gleichstrom geeicht werden; sie müssen vielmehr mit Wechselstrom geeicht werden und zwar am besten mit einer Wechselspannung, die der nachher zu messenden

möglichst nahe kommt, was sekundliche Wechselzahl, wenn möglich auch was Kurvenform anlangt. Namentlich ist aber auf die Wechselzahl bei den meisten Wechselstromvoltmetern Rücksicht zu nehmen (II, 1 in **25 ff.**), so daß für erheblich abweichende Wechselzahlen, besonders für hohe, neue Eichkurven aufzunehmen sind. Bei diesen Eichungen von Wechselstromvoltmetern verfährt man am besten so, daß man ein praktisch induktionsfreies Voltmeter, meist ein gut arbeitendes Hitzdrahtvoltmeter zunächst sorgfältig mit Gleichstrom eicht (Fig. 1) und dieses alsdann als Zwischennormale für die Wechselstromeichung benutzt. Die letztere kann man entweder so ausführen, daß man anstelle der Batterie in Fig. 1 die zur Eichung benutzte Wechselstromquelle (Dynamo) einschaltet. Wirtschaftlicher und für die Erlangung passender Spannungswerte und Zwischenstufen weit bequemer ist hierfür aber der vom Verfasser angegebene Wechselspannungswähler (Näheres siehe ETZ 1902, Heft 40), ein Apparat, der sich nicht nur

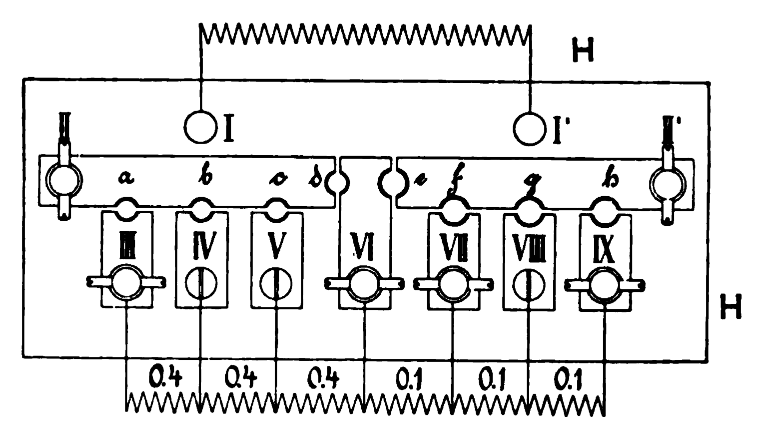


Fig. 3.

für Wechselstromeichungen, sondern auch für andere Laboratoriumszwecke, z. B. Eisenuntersuchungen, als sehr bequem und vielseitig bewährt hat. Unter zwangläufiger Vermeidung von Kurzschluß lassen sich durch die verschiedenen Stöpselvariationen (Fig. 3) eine große Zahl von Spannungswerten in passenden Stufen zwischen den Klemmen II—II' oder auch I—II abnehmen, wenn man die ungeänderte Dynamospannung an die Klemmen I—I' oder auch zwischen III—IX legt und durch Voll-, vielfach besser noch durch Halbtransformation (unter Verbindung der beiden mit *H* bezeichneten Klemmen bzw. Wickelungsenden) die benötigte Spannung erzeugt. Hierdurch kann man sich auf bequeme Weise auch sehr kleine stabile Wechselspannungen verschaffen. Über verschiedene andere Schaltkombinationen siehe a. a. O.

Bei allen Eichungen empfiehlt es sich nicht nur in einer Richtung die Vergleichung auszuführen, sondern einmal bei allmählich aufsteigenden, hieran anschließend bei allmählich absteigenden Skalenwerten zu eichen. Dies gilt namentlich auch für die Eichungen nach Fig. 1 und bezweckt ein etwaiges Nachhinken, z. B. der Wärmewirkung (II, 1 in **20**), oder die Hysterese irgend welcher Art, sei es eigentliche oder magnetische, sei es mechanische oder Reibungshysterese, aufzudecken. Die Breite der Schleife zwischen aufsteigender und absteigender Kurve gibt ein Maß für die unter Umständen zu erwartenden Abweichungen zwischen der mittleren Normalkurve und

den Ablesewerten, je nach Richtung der Zeigerbewegung. Je schmäler die Schleife, desto besser das Instrument. Fehler dieser Art, welche durch mechanische Reibung verursacht werden sollten, lassen sich durch sanftes Klopfen am Tisch bzw. am Instrument vermindern (II, 1 in 2 u. 3).

Das Nachhinken des Ausschlages hinter dem elektrischen Spannungszustand oder der Einfluß der Einschaltungsdauer muß experimentell bestimmt und ein Fehler nach Kräften dadurch beseitigt werden, daß bei Eichung und späterer Verwendung angenähert gleiche Zeitabstände zwischen Einschalten bzw. Spannungsänderung und Ablesung gewählt werden. Um die größten Abweichungen, welche durch die Nachwirkung des Wärmezustandes der Umgebung veranlaßt werden können, kenntlich zu machen, diene folgende kleine Tabelle der Untersuchungen der Ph.T.R. an neueren Hitzdrahtvoltmetern von H. & Br., welche wegen ihrer Genauigkeit und Konstanz der Angaben nunmehr auch zur Beglaubigung zugelassen werden.

Einstellung auf den Skalenpunkt	Spannung an den Klemmen des Instrumentes			Änderung durch die Dauereinschaltung	
	anfänglich	nach Dauereinschaltungen 15 Minuten mit 80 Volt	nach Dauereinschaltungen 30 Minuten mit 80 Volt	von 15 Minuten	von 30 Minuten
40,0	$39{,}7_4$ Volt	$40{,}0_4$ Volt	$40{,}1_4$ Volt	$+ 0{,}3_0$ Volt	$+ 0{,}4_0$ Volt
60,0	$59{,}9_1$ "	$60{,}0_8$ "	$60{,}1_4$ "	$+ 0{,}1_7$ "	$+ 0{,}2_3$ "
70,0	$69{,}9_4$ "	$70{,}1_9$ "	$70{,}1_5$ "	$+ 0{,}2_5$ "	$+ 0{,}2_1$ "
80,0	$79{,}5_0$ "	$79{,}9_4$ "	$79{,}9_5$ "	$+ 0{,}4_4$ "	$+ 0{,}4_5$ "

8. Kleine Spannungen.

Bei kleineren Spannungswerten, etwa unter 20—30 Volt, kann man elektrostatische Instrumente im allgemeinen nicht mehr verwenden, wenigstens gehen die direktzeigenden Multicellularvoltmeter nicht unter diese Grenze herunter. Etwas tiefer gelangt man bei Benutzung von Quadrantenelektrometern mit Spiegelablesung, die für Wechselspannung zunächst nur in der sogenannten idiostatischen Schaltung, d. i. bei leitender Verbindung von Nadel mit dem einen Quadrantenpaar (Fig. 2) benutzbar sind und, wie in 1 angegeben, mit Gleichspannung geeicht werden. Wegen der quadratischen Wirkungsweise pflegen aber auch hier die Ausschläge bei Werten unter etwa 10 Volt schon so klein zu werden, daß in Verbindung mit der größeren Unsicherheit der Einstellung in der Nähe des Nullpunktes, die prozentuale Zuverlässigkeit zu gering wird. Auch sind Störungseinflüsse irgend welcher Art, z. B. durch Reibungselektrizität, oder durch Strahlungen bei dem Elektrometer von Dolezalek, um so schwerer zu vermeiden, je empfindlicher die Instrumente sind.

Etwas günstiger liegen die Verhältnisse bei den stromverbrauchenden Voltmetern. Bei Dynamometern lassen sich hier Werte bis zu etwa 5 Volt herunter mit ausreichender Genauigkeit noch messen, doch ist bei den alsdann benutzten kleinsten Beträgen von bifilarem Vorschaltwiderstand der verhältnismäßige Einfluß der Selbstinduktion dieser Instrumente in der Regel schon bei 50 sekundlichen Perioden nicht mehr zu vernachlässigen und bedingt bei höheren Wechselzahlen schon erhebliche und ziemlich lästige Korrektionen. Man kann diese zwar durch Verminderung der Spulenwindungen verringern, doch benötigen diese Instrumente alsdann soviel Strom (bis 0,5 Ampere), daß für Laboratoriumsmessungen ihre Verwendung aus diesem

Grunde in vielen Fällen ausgeschlossen erscheint. Man wird in solchen Fällen noch lieber zu einem Hitzdrahtvoltmeter greifen.

Die neueren Ausführungen der Hitzdrahtvoltmeter mit getrennten Vorschaltwiderständen für die üblichen Meßbereiche bis 130 bzw. 260 Volt geben dem Meßtechniker die Möglichkeit an die Hand, sich auch für alle kleineren Spannungen, welche die feinere Teilung (unter 40 Volt bei Skala der Fig. 4) unterschreiten, ein geeignetes Meßinstrument zu verschaffen. Zu diesem Zweck ersetzt man den beigegebenen Widerstand durch einen anderen (kleineren) von passender Größe. Am besten eignen sich hierzu Glühlampen mit verschiedenen Widerständen, aus denen sich leicht ein Satz so zusammenstellen läßt, daß man aneinander anschließende Eichkurven erhält, die sich für die Benutzung nur in dem Gebiet mit größeren Ausschlägen und feinerer Teilung bewegen. Die größte Empfindlichkeit ohne beigegebenen Vorschaltwiderstand liefert alsdann Werte, die etwa zwischen 5—3 Volt liegen, aber noch Ablesungen bis gegen 1 Volt herunter zu machen gestatten, wenn auch meist mit geringerer prozentualer Genauigkeit. Die Eichung erfolgt am besten, wie in **2** angegeben mit Auftragung der Ablesungen, etwa 30—130, als Abscissen und der zugehörigen effektiven Spannung in Volt als Ordinaten

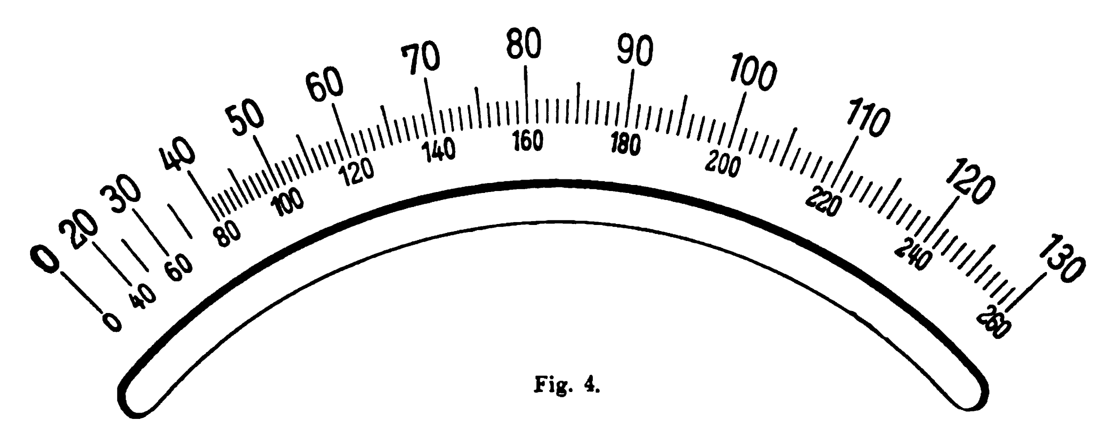


Fig. 4.

(siehe Fig. 5). Allerdings ist auch hier der Stromverbrauch schon für viele Zwecke, namentlich bei Laboratoriumsmessungen mit kleineren Leistungen, recht erheblich (bis 0·2 Amp. und darüber) und bedingt besondere Aufmerksamkeit, sobald es sich um Strom- bzw. Leistungskorrektionen handelt (**68**). Um diese Werte, sowie ein Bild über etwaige Änderungen der Ausgleichverhältnisse durch Anlegen (Parallelschaltung) eines solchen Voltmeters sogleich zur Hand zu haben, ergänzt man die Spannungseichung am besten sogleich durch die Bestimmung des zu jedem Ablesewert gehörigen, vom Vorschaltwiderstand unabhängigen Stromverbrauchs des Instruments. Die Werte in Ampere multipliziert mit der zugehörigen, vom Vorschaltwiderstand abhängigen Spannung liefert alsdann den Wattverbrauch des Voltmeters; die Division des Spannungsbedarfs durch den Stromverbrauch den Widerstand in Ohm. Als Beispiel einer solchen Eichung sind die Werte für ein Hitzdrahtvoltmeter von H. & Br. mit dem beigegebenen Vorschaltwiderstand in Fig 5a zusammengestellt, hingegen für seine Benutzung mit Glühlampenvorschaltwiderstand in 5b. Bei kleinen Vorschaltwiderständen ist aber sehr darauf zu achten, daß die Auswechslung der Hitzdrahtvoltmetersicherung mit ihrem verhältnismäßig hohen und von Stück zu Stück

wechselnden Widerstand erhebliche Änderungen der Eichkurve zur Folge haben kann. Bei Laboratoriumsmessungen kommt für niedere Spannungen noch das feindrähtige Spiegelhitzdrahtinstrument nach Friese (ETZ 1895, 726) in Frage. Sein Stromverbrauch ist wegen seines größeren Nettowiderstandes (etwa 50 Ω) geringer als bei den direktzeigenden Instrumenten, nämlich etwa

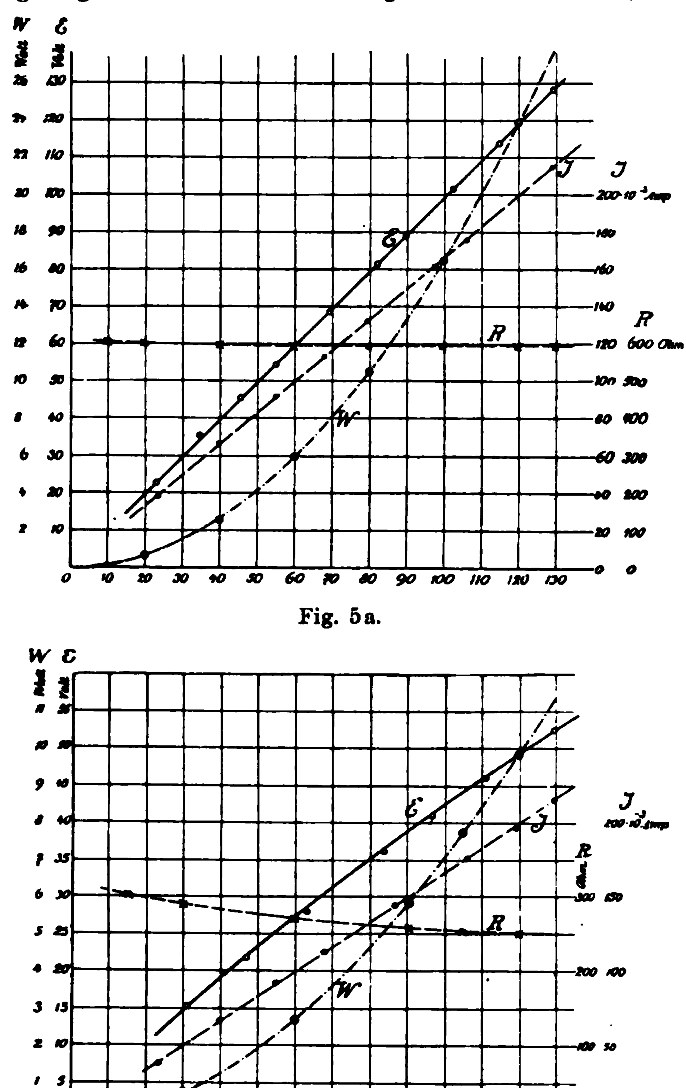


Fig. 5a.

Fig. 5b.

0·1 Ampere für einen maximalen Ausschlag von etwa 800 mm bei etwa 2·7 m Skalenentfernung; sein Meßbereich von etwa 0 bis 5 Volt gestattet noch bis herunter zu etwa 1 Volt mit leidlicher prozentualer Zuverlässigkeit zu messen. Die Nullpunktsverlegungen nach größeren Ausschlägen machen sich etwas störend bemerkbar, veranlassen aber ohne ständiges Nachstellen der Nulllage keine größeren Fehler als bei jedesmaliger Nachstellung, da die Verlegungen größtenteils elastischer Natur sind. Weiteres siehe II, 1 in **162**.

Endlich wäre für direkte Messung kleiner Spannungen bis herunter zu Zehnteln von Volt noch das Spiegeldynamometer (II, 1 in **89 ff.**) zu nennen. Abgesehen davon, daß die älteren Konstruktionen wegen ihres Metallgehäuses für Wechselstrommessungen auf Grund von Gleichstromeichungen ungeeignet sind, so sind auch die neueren Konstruktionen wegen ihrer Selbst- und Wechselinduktionskoeffizienten für Spannungsmessungen nur mit Vorsicht zu gebrauchen. Auch sind sie hierfür wegen ihrer hohen Eigenwiderstände, meist von einigen Hundert Ohm, weniger empfindlich als man nach ihren Stromempfindlichkeiten im ersten Augenblick glauben sollte; sie kommen überwiegend nur für mehr physikalische Laboratoriumsmessungen zur Ermittelung kleiner Wechselstromstärken bzw. als Nullinstrument in Frage. Scheut man die Unbequemlichkeiten nicht, welche sowohl das Arbeiten mit ihnen als die Korrektionen gegenüber der Gleichstromeichung bieten, so können sie bei geeigneter Konstruktion auch wertvolle Wechselspannungszeiger für bestimmte Fälle darstellen, bei denen Wert auf möglichst kleinen Stromverbrauch (nicht über 1 bis 2 Hundertel Ampere) gelegt wird.

Indirekte Messung kleiner Spannungen ist noch durch Transformation möglich, etwa indem man die zu messende kleine Spannung an eine kleine Windungsabteilung des Wechselspannungswählers in Fig. 3 legt, diesen durch Verbindung der Klemmen H H als Halbtransformator benutzt und die auf das 25fache erhöhte Spannung zwischen den Klemmen zur Messung bringt. Obwohl man so unter Verwendung eines der obigen Hitzdratinstrumente bis auf etwa $^1/_{20}$ Volt herab messen kann, so ist doch der verhältnismäßig hohe Strombedarf bei dieser Transformation nach oben nicht zu übersehen, ein Übelstand, der sich zwar durch Verwendung elektrostatischer Spannungsmesser vermeiden läßt, doch ist man alsdann schon viel früher an der brauchbaren Meßgrenze angelangt (siehe oben). Spielt der Stromverbrauch keine wesentliche Rolle, so kann man auch Amperemeter, z. B. Hitzdrahtamperemeter (ohne Nebenschluß), für schwächere Ströme, indem man sie wie Voltmeter benutzt, zur Messung kleiner Spannungsbeträge heranziehen.

4. Hochspannungen. Der direkten Messung von Hochspannungen, welche gerade bei Wechselstrom eine besonders große Rolle spielen, stellen sich folgende Schwierigkeiten entgegen. Die stromverbrauchenden Spannungsmesser lassen sich zwar durch Verwendung genügend großer Mengen induktionsfreien Widerstandes ohne weiteres mit gleicher prozentualer Zuverlässigkeit in ihrem Meßbereich beliebig erweitern, doch wird abgesehen von der Kostspieligkeit und dem Umfang der erforderlichen Widerstandssätze, der Leistungsbedarf, der direkt proportional mit der Spannung wächst, bei diesen Voltmetern bald so groß, daß eine solche Spannungsmessung nicht nur sehr unwirtschaftlich wird, sondern in vielen Fällen, namentlich bei Laboratoriumsmessungen, geradezu unausführbar ist.

Eine weitere Möglichkeit direkter Messung bieten die elektrostatischen Voltmeter. Bei Laboratoriumsmessungen sind dieselben auch vielfach sehr schätzbar und die Erweiterung des Meßbereiches bei einem gegebenen Instrumente nach oben ist durch Vorschaltung passender kleiner Hilfskapazitäten C_H (Fig. 6), z. B. Stanniolbelegungen auf reichlich großen Hartgummiplatten, sehr leicht und bequem ausführbar. Die Spannungsverteilung erfolgt gemäß dem Ausgleichwiderstand $\frac{1}{\omega \cdot C}$ für Wechsel-

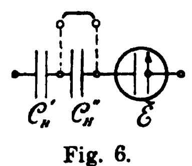


Fig. 6.

strom. Daher muß für die Erweiterung des Meßbereichs eines elektrostatischen Voltmeters bis auf etwa den dreifachen Wert so verfahren werden, daß 2 kleine Kapazitäten C_H von angenähert demselben Wert wie die Kapazität des Voltmeters (meist Größenordnung 10^{-5} bis 10^{-4} Mf) in Reihe mit dem Voltmeter $\tilde{E}$ geschaltet werden (Fig. 6). Beim Kurzschließen der einen, z. B. C_H'', hat man alsdann etwa den doppelten Meßbereich, bei Einschaltung von C_H'' den dreifachen. Über die Messung von C_H siehe in **37**. Dennoch haben diese Instrumente in der elektrotechnischen Praxis bisher keine sehr ausgedehnte Verwendung gefunden, weil die Richtkräfte doch keine hinreichend energische Einstellung gestatten, so daß diese Instrumente immerhin eine etwas subtile Behandlung verlangen und sonst leicht zu gröberen Fehlern Veranlassung geben können. Auch ist der in **2** erwähnte Einfluß des Wechselpotentiales oder der Erdungsstelle auf die Ausschlagswerte in vielen Fällen nicht außer acht zu lassen. Da weiterhin alle diese Instrumente — mit Ausnahme der selten verwendeten absoluten Spannungswage von THOMSON (II, 1 in **21**) — empirisch geeicht werden müssen und für Nacheichungen gleichfalls eine Normalmeßvorrichtung für die Hochspannungswerte verlangen, so kommt man um diese Schwierigkeit bei der letzteren nicht herum.

Man bedient sich daher sowohl in der Praxis als auch im Laboratorium der indirekten Messung der Hochspannungen. Während man aber in der Praxis fast ausnahmslos die bequeme Transformation benutzt, d. h. einen Meßtransformator für die Spannungsmessung verwendet, der die zu messende Hochspannung in eine leicht meßbare Mittelspannung überführt, so kommt man hiermit im Laboratorium im allgemeinen nicht aus, wenigstens dann nicht, wenn es sich um Eichung bzw. Nacheichung der Skala eines solchen Transformatorinstrumentes oder überhaupt eines Hochspannungsvoltmeters handelt.

Vielfach wird angenommen, daß das bekannte Verhältnis der Wickelungszahlen des Meßtransformators hinreichend genau den Multiplikationsfaktor für die Angaben des Niederspannungsvoltmeters liefere. Dem ist aber nicht so, wenigstens nicht bei kleineren Meßtransformatoren für hohe Spannungen (10 000 Volt und darüber). Hier kann die Streuung, bei den verhältnismäßig großen Abständen der Wickelungen und der verhältnismäßig großen Belastung des Transformators durch ein Hitzdrahtinstrument, so erheblich werden, daß sehr grobe Fehler entstehen, wenn einfach das Übersetzungsverhältnis bei der Eichung eingeführt wird, ohne eine weitere zuverlässige Nachprüfung des Hochspannungswertes. So fand der Verfasser z. B. an den Schaltbrettvoltmetern einer Drehstromanlage mit 10 000 Volt, daß gleichmäßig beide Hitzdrahtinstrumente bei der Normalspannung um mehr als 10% falsch zeigten und zwar zu hoch, so daß bei dem Skalenwert 10 000 der wahre Spannungswert nur etwa 8 800 Volt zwischen 2 Fernleitungen betrug. Da dies von Anfang an, d. h. sogleich nach ihrem Eintreffen aus der Instrumentenfabrik der Fall gewesen war, so läßt sich dies bei gleichbleibendem Übersetzungsverhältnis wohl nur in der Weise erklären, daß bei der Eichung im Fabriklaboratorium die Hochspannungsskala aus Niederspannung und dem Wickelungsverhältnis kleiner und stark streuender Meßtransformatoren (mit dem nominellen, aber in Wirklichkeit stark veränderlichen Übersetzungsverhältnis 1 : 100) abgeleitet wurde, während die Meßtransformatoren der Zentrale sehr reichlich bemessen waren.

Auf alle Fälle beweist dies, daß man für zuverlässige Hochspannungs-

bestimmungen im Laboratorium und zur Kontrolle der Transformationsmethode andere Meßverfahren (ohne Transformation) nicht entbehren kann. An indirekten Messungen bleiben hier nur noch die Verfahren der Spannungsteilung. Diese Methoden der Hochspannungsmessung sind daher für das Laboratorium sehr wichtig und bilden geradezu die letzte Instanz. Bei (symmetrischer) Wechselspannung kann die Teilung auf zweierlei Weise erfolgen, entweder mit Hilfe von in Reihe geschalteten Widerständen oder von in Reihe geschalteten Kapazitäten (Fig. 7). In beiden Fällen findet die Verteilung der zu messenden Spannung $\tilde{E}$ im direkten Verhältnis mit den Wechselstrom-Ausgleichwiderständen statt (I, 2 in 148 ff.). Legt man nun einen Wechselspannungsmesser $\tilde{E}_1$ an einen genau bekannten Bruchteil des Ausgleichwiderstandes und wählt den letzteren sowie den Spannungsmesser $\tilde{E}_1$ so, daß durch die Parallelschaltung die Ausgleichverhältnisse nicht merklich beeinflußt werden, d. h. den Ausgleichwiderstand von $\tilde{E}_1$ genügend groß gegenüber dem von R_1 bzw. C_1, so gestattet die Bestimmung von $\tilde{E}_1$ eine ausreichend genaue Ermittelung von $\tilde{E} = \frac{R}{R_1} \cdot \tilde{E}_1$ bzw. $= \frac{C_1}{C_p} \cdot \tilde{E}_1$ bzw. $= \frac{C_h}{C_1} \cdot E_1$, wenn R die Summe aller in Reihe geschalteten Widerstände, bzw. C_p den Parallelschaltungswert, bzw. C_h den Reihenschaltungswert aller in Fig. 7 hintereinander geschalteter Kapazitäten bezeichnet. Bei ausreichender Erfüllung der stillschweigenden Voraussetzung über den Einfluß der Parallelschaltung wird die erreichbare prozentuale Zuverlässigkeit durch diejenige der Ablesung von $\tilde{E}_1$ und des Verhältnisses von $\frac{R}{R_1}$ bzw. von $\frac{C_1}{C}$ bedingt. Die Erfüllung des ersten Punktes zwingt in beiden Fällen zur Verwendung eines elektrostatischen Niederspannungszeigers (Spiegelelektrometer oder Multicellularvoltmeter) für $\tilde{E}_1$. Bei Benutzung von Widerständen verwendet man am besten Bifilarrollen von sehr dünnem Manganindraht in Einheiten von ungefähr 10 000—20 000 Ω, deren jede etwa 100 Volt verträgt, während bei Kapazitäten etwa jede dieser Widerstandseinheiten durch einen Glimmerkondensator von etwa 0·1 Mf zu ersetzen wäre. Mir persönlich erscheinen Widerstandsrollen etwas zuverlässiger und bequemer, da ihre Herstellung einfach und eine genaue Abgleichung nicht erforderlich ist, wohl aber eine genaue Messung der einzelnen Abteilungen, die sich jedoch bei Widerständen einfacher und mit größerer prozentualer Zuverlässigkeit durchführen läßt als bei Kapazitäten.

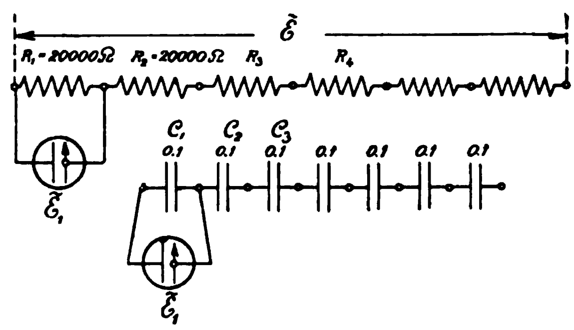


Fig. 7.

Was die Erfüllung jener stillschweigenden Voraussetzung anlangt, so ist die Eigenkapazität des elektrostatischen Voltmeters für die erforderliche Größe von C_1 nach unten und von R_1 nach oben maßgebend. Besitzt z. B., wie vielf ch, das elektrostatische Voltmeter eine Eigenkapazität C_V von der

Größenordnung $1 \cdot 10^{-4}$ Mf (vgl. hierzu in **34**), so sollte C_1 den Wert 0·1 Mf nicht wesentlich unterschreiten, wenn eine Korrektion bzw. ein merklicher Fehler vermieden werden soll.

Bei Widerständen für die Spannungsteilung kommt noch die Frequenz oder ω in Frage. Für $\omega < 1000$ wäre $Z = \frac{1}{\omega \cdot C_V} > 10^7\ \Omega$, doch kann man hier für die Parallelschaltung bei R_1 wesentlich über $10^4\ \Omega$ hinausgehen, weil die Stromkomponenten der Parallelzweige nahezu um 90^0 gegeneinander versetzt sind, so daß erst bei $R_1 > 10^6\ \Omega$ die Korrektion bzw. der Fehler durch Parallelschaltung den Betrag von $^1/_2\ ^0/_0$ überschreitet.

B. Wechselstromstärken.

5. Nullinstrumente.

Bei der Stromstärkemessung und den auf den verschiedenen Stromstärkewirkungen aufgebauten Meßinstrumenten, deren Übersicht bereits früher (I, 1 in **40**) gegeben wurde, unterscheidet der Meßtechniker am besten folgende Gruppen der Meßverfahren:

1. Anwendung von Instrumenten, welche mehr für den Nachweis geringer Stromstärken als für ihre Messung mit großer prozentualer Zuverlässigkeit geeignet sind.

2. Anwendung von (meist technischen) Stromstärkemessern zur unmittelbaren Stromstärkebestimmung bei möglichst großer prozentualer Zuverlässigkeit des Meßwertes.

3. Indirekte Verfahren zur Bestimmung der Stromstärke.

Die erste Gruppe umfaßt zunächst die Benutzung aller empfindlichen Weicheiseninstrumente (II, 1 in **25**), namentlich der für Spiegelablesungen eingerichteten mit optischem Zeiger.

Für Wechselströme mit höherer Frequenz (mehr als 100 Perioden in der Sekunde) ist das technisch wertvollste, weil weitaus handlichste Meßinstrument dieser Art nicht ein Weicheiseninstrument mit optischem sondern mit akustischem Merkzeichen (II, 1 in **19**), nämlich das Telephon; gleichzeitig besitzt es einen hohen Grad von Empfindlichkeit, wie z. B. Isolationsprüfungen mit Wechselstrom und Telephon erkennen lassen. Eine genauere quantitative Bestimmung läßt aber die Beschaffenheit unseres Gehörorganes nicht zu. Hieraus erklären sich die zahlreichen Bestrebungen entweder das Telephon selbst oder auch verwandte Weicheisenapparate mit einem optischen Merkzeichen (Zeiger) zu verbinden durch Anbringung eines Spiegels.

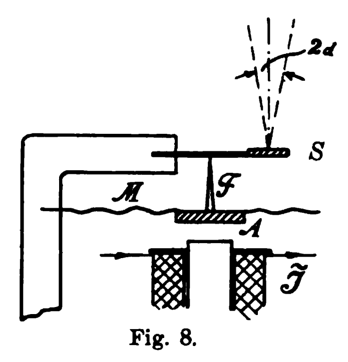


Fig. 8.

Eine Ausbildung zur objektiven Darstellung von Wechselstromkurven erfuhr eine solche Anordnung zuerst durch O. Frölich (ETZ 1889, 345 u. 368). Als Meß- bzw. Anzeigeinstrument für geringe Stromstärken wurde es von M. Wien (1891 Wied. Ann. 42, 592 u. 44, 681) in dessen optischem Telephon ausgebildet. Die Anziehung sowie überhaupt die Bewegungen des kleinen Weicheisenankers A bzw. der Telephonmembran M (Fig. 8) werden durch den Stift F auf eine Blattfeder mit dem Spiegel S übertragen, dessen Schwingungen

durch die Breite des erzeugten Lichtbandes als Maß für die Erregerstromstärke $\tilde{J}$ dienen können. Die Möglichkeit einer Eichung mit Gleichstrom ist, im Gegensatz zu dem akustischen Telephon, zwar vorhanden, wenn man die Größe der Ablenkung zu einem genau gemessenen Gleichstrom $\bar{J}$ in der Erregerspule bestimmt, doch ist dieser Vorteil nur scheinbar, weil die Eigenschwingungen der Apparatteile beim Wechselstrom ins Spiel treten, ein Moment, das hier und bei allen auf Schwingungsweiten beruhenden Angaben von Wechselstrominstrumenten als mehr oder weniger große Fehlerquelle nie aus dem Auge zu verlieren ist. Hinsichtlich der Empfindlichkeit, d. h. für eine Verwendung als Nullinstrument bei Wechselstrom ist dies aber ein Vorteil, insofern bei Anpassung der Eigenschwindung der Membran an die Frequenz des nachzuweisenden Wechselstromes durch Multiplikation der Antriebe (Resonanz- oder Multiplikationsverfahren) die Empfindlichkeit für Wechselstrom auf etwa das Hundertfache (10^{-8} Amp.) gegenüber Gleichstrom (10^{-6} Amp.) gesteigert werden kann. Wird hierdurch eine Eichung mit Gleichstrom vereitelt, so ist außerdem auch noch zu beachten, daß die Angaben bei Wechselstrom nicht den effektiven Mittelwerten entsprechen, weil die Eigenschwingung eine Heraushebung der zugehörigen Sinusschwingung bedingt.

Ein ähnliches Verhalten zeigt auch das Vibrationsgalvanometer von RUBENS (1895 Wied. Ann. 56, 27; auch ETZ 1896, 115), doch wird hier anstelle der Telephonmembran eine gespannte Metallsaite — in Fig. 9 in der Projektion als Punkt erscheinend —, an der die abgelenkten Weicheisenstäbchen A quer befestigt sind, in Torsionsschwingungen versetzt, deren Weite mit Hilfe eines oberhalb von A befestigten Spiegels gemessen wird. Die Vibration des Weicheisenstückes A erfolgt mit Hilfe der kreuzweis angeordneten permanenten Magnetsysteme I und II, welche durch den Wechselstrom $\tilde{J}$ bei dem in Fig. 9 angedeuteten Wickelungsverlauf abwechselnd verstärkt (I) und geschwächt (II) werden. Wegen leichterer Veränderung der Eigenschwingung der Saite durch verschieden starkes Spannen ist der Meßbereich der Wechselstromfrequenzen größer als beim optischen Telephon und umfaßt etwa 2 Oktaven. Die Eigentümlichkeiten der Vibrationsgalvanometer und der Fehlerquellen beim Arbeiten mit ihnen sind neuerdings ausführlicher von ROSA und GROVER (Washington 1905 Bureau of standards, Druckschrift Nr. 14) untersucht worden.

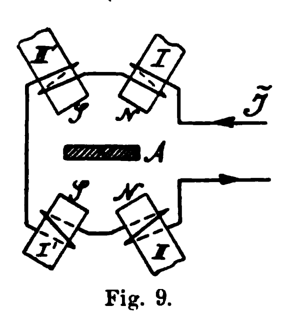


Fig. 9.

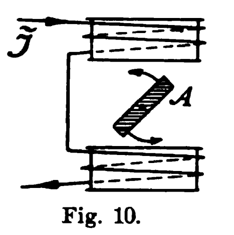


Fig. 10.

Weniger empfindlich, dafür aber eher einer Eichung mit Gleichstrom zugänglich sind Weicheisenstrumente mit einfacher Ablenkung und Spiegelablesung, wie z. B. das sogenannte Nadeldynamometer von BELLATI und GILTAY (1885 Wied. Ann. 25, 325), bei welchem ein Weicheisenstäbchen A etwa unter 45° gegen die Achse der Stromspulen geneigt bei Nullstrom eingestellt wird (Fig. 10). Wird jetzt durch die Spulen Gleich- oder Wechselstrom geschickt, so wird in beiden Fällen durch Magnetisierung von A eine Drehung in Richtung der Spulenachse erfolgen (vgl. I, 1 in **136**). Wegen der Abweichungen der Weicheiseninstrumente in ihrem Verhalten gegenüber

Gleich- und Wechselstrom, sowie auf Grund der ungünstigen Kritik BEHN-ESCHENBURGS über die Zuverlässigkeit der Angaben dieser Nadeldynamometer wird man aber auch diese Instrumente wohl mehr als Null- denn als eigentliche Meßinstrumente verwenden, obwohl sie den Übergang zu den letzteren bilden. Weiteres über Laboratoriumsinstrumente zur Anzeige bzw. Messung schwacher Wechselströme siehe auch M. WIEN (1901 Ann. d. Ph. 4, 425).

6. Stromzeiger für direkte Messung. Eichung derselben.

Die zweite Gruppe der Stromstärkemesser wird im wesentlichen die Hitzdrahtinstrumente und die eigentlichen Dynamometer einschließlich der Stromwagen umfassen, denen mit gewissen Einschränkungen (II, 1 in **25** u. **27**) noch die technischen Weicheiseninstrumente und die reinen Wechselstrominstrumente, etwa in Gestalt der Ferrariszeiger, anzuschließen wären. Um größere Wiederholungen zu vermeiden, wird aber auf diese Instrumente hier nicht näher einzugehen sein, da sie zum Teil schon a. a. O. behandelt sind, namentlich aber in diesem Bande bei den technischen Meßinstrumenten eine eingehende Berücksichtigung finden. An dieser Stelle wäre nur auf ihre Eichung und die dabei nötigen Vorsichtsmaßregeln hinzuweisen.

Die Einteilung der Wechselstromzeiger in solche, welche eine Eichung mit Gleichstrom und Benutzung dieser Eichskala für Wechselstrom ohne weiteres zulassen und in solche, welche eine Wechselstromeichung mit Hilfe eines der vorstehenden Instrumente erfordern, wird hier in gleicher Weise wie bei den Spannungszeigern (**2**) zu erfolgen haben. Auch die Eichschaltung wird ähnlich wie dort (Fig. 1) sein, natürlich aber nicht die bei Voltmetern erforderliche Parallelschaltung, sondern Reihenschaltung des Normal-Amperemeters N.A. mit dem zu eichenden Amperemeter H.A. nach Fig. 11 notwendig machen, wobei der Schlüssel *S* für höhere Stromstärken geöffnet und der Regulierwiderstand *V* als Vorschaltwiderstand für die Amperemeter benutzt wird, während für niedere Stromstärken und namentlich für Instrumente mit niederen Meßbereichen besser im Nebenschluß zu *V* bei geschlossenem *S* gearbeitet wird. Für Wechselstromeichungen wird auch hier am wirtschaftlichsten und bequemsten mit Transformierung, etwa mit dem in Fig. 3 angeführten Wechselspannungswähler, gearbeitet.

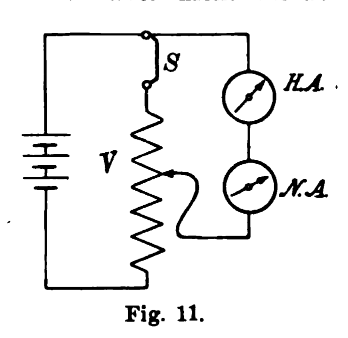


Fig. 11.

Bei den Eichungen hat man namentlich auf folgende weniger leicht in die Augen springenden Fehlerquellen zu achten:

Bei Benutzung der Stromzeiger zur Messung von Wechselstromstärken niederer (technischer) Wechselzahlen kann man bei Hitzdrahtinstrumenten und bei einwandfreien Dynamometern (**3**) zwar die Gleichstromskala bei Einhaltung der stillschweigenden Voraussetzungen (II, 1 in **1**) auch für Wechselstrom benutzen, doch muß man bei Dynamometern bei der Gleichstromeichung unter allen Umständen auf den Einfluß des Erdfeldes Rücksicht nehmen, um merkliche Fehler zu vermeiden. Dies geschieht, indem man bei ungeänderter Eichstromstärke und Lage des Dynamometers eine zweite Ablesung bei umgekehrter Stromrichtung im Dynamometer macht und das Mittel aus beiden als Normalwert für Wechselstrom nimmt (vgl. hierzu bei Fig. 24 in II, 1). Diese Umkehrung geschieht bei polarisiertem Normalinstrument am besten durch Einschalten eines Stromwenders ohne Unterbrechung, etwa wie

Fig. 52 in **27** andeutet, in die zu den Klemmen der Dynamometerwickelung (I) führende Leitung.

Weiterhin ist zu beachten, daß selbst bei Hitzdrahtinstrumenten und Dynamometern die Gültigkeit der Gleichstromskala für Wechselstrom beschränkt ist. Je mehr die sekundliche Wechselzahl des zu messenden Wechselstromes zunimmt, mit desto größerer Vorsicht und Kritik sind die Angaben der mit gekreuzten Spulen versehenen Dynamometer d. h. aller direktzeigenden, sowie der mit Nebenschluß arbeitenden Instrumente, also auch der meisten Hitzdrahtinstrumente, zu behandeln.

In beiden Fällen hat der Verfasser große Abweichungen von der Gleichstromeichskala bis zur völligen Unbrauchbarkeit dieser Werte bei hohen Frequenzen aufgefunden (Untersuchungen am Wellenstromlichtbogen V. d. V. z. F. d. G. 1904, 411). Die Erklärung lag bei dem direktzeigenden Dynamometer in dem stetig wachsenden Einfluß der Wechselinduktionsspannung, welche das Wechselfeld der festen Spule in der (mit Nebenschluß versehenen) beweglichen Spule erzeugt, wenn die beiden Spulenachsen nicht senkrecht zueinander stehen. Als Normalinstrumente waren daher nur Torsionsdynamometer mit beweglicher Spule ohne Nebenschluß und dauernd um 90° versetzten Spulenachsen verwendbar, falls sie unter Vermeidung geschlossener Metallrahmen, wie ihn ein älteres Dynamometer von S. & H. für schwächere Ströme aufwies, oder größerer geschlossener Metallflächen als Sitz von Wirbelstrombahnen ausgeführt waren. Über neuere Spiegeldynamometer mit elektrodynamischer Kompensation mittels Gleichstrom siehe in **68**. Bei den Hitzdrahtamperemetern mit Nebenschluß zeigte sich ein fälschender Einfluß der Oberflächenwirkung (I, 2 in **176**) auf den Ausschlag. Da die Größe der Oberflächenwirkung auf den Ausgleichwiderstand im allgemeinen ein verschiedener ist bei dem Hitzdraht und bei dem Nebenschluß wegen der Verschiedenheit des Durchmessers, so wird auch die Stromverteilung auf Hitzdraht und Nebenschluß bei wachsender Frequenz eine andere. Wegen des kleineren Durchmessers beim Hitzdraht wird dies von einer bestimmten Frequenz ab eine zu hohe Angabe des mit Nebenschluß arbeitenden Instrumentes zur Folge haben. Bei neueren Präzisionsinstrumenten für 2 niedere Meßbereiche (0—1 und 1—6 Amp.), welche nicht gewellte Bleche sondern massive Konstantandrähte als Nebenschlüsse besitzen, trat dies besonders deutlich hervor, so daß von etwa 20000 sekundlichen Perioden ab die Ausschläge sehr rasch auf das Vielfache des wahren Wertes zunahmen. Hingegen konnten bei Nebenschlüssen aus dünnem gewelltem Blech noch bei viel höheren Periodenzahlen keine merkbaren Abweichungen nachgewiesen werden. Dynamometer mit Nebenschlüssen zur beweglichen Spule zeigen schon bei niederen Frequenzen Abhängigkeit der Angaben von diesen wegen Variation der Ausgleichwiderstände in den beiden Zweigen und sind daher mit noch größerer Vorsicht zu gebrauchen, d. h. durch Wechselstromeichungen mit einwandfreien Normalinstrumenten, z. B. Hitzdrahtinstrumenten, nachzuprüfen; bei höheren Frequenzen sind sie überhaupt nicht zu verwenden, schon wegen der obenerwähnten Wechselinduktionswirkung.

Alle übrigen Stromzeiger, wie Weicheiseninstrumente und Ferrariszeiger, benötigen Wechselstromeichung der Skala. Bei den Weicheiseninstrumenten hängt die Änderung der Angaben mit der Wechselzahl zwar wesentlich von Form und Dicke des beweglichen Eisenkernes ab, hält sich aber bei allen neueren Instrumenten mit dünnen und kurzen Eisenkörpern inner-

halb ziemlich enger Grenzen, die selbst bei sehr hohen Frequenzen (über 20000 in der Sekunde) bei Vermeidung von entmagnetisierenden Wirbelstrombahnen im Gehäuse nicht merklich anwachsen; ja in einigen Fällen werden die Abweichungen wieder kleiner und haben gegenüber der Gleichstromskala eine Erhöhung der Ausschläge zur Folge.

Ferrariszeiger sind in ihrer Verwendung auf weit engere Grenzen der Frequenz beschränkt; sie werden mit wachsender Frequenz, wegen Änderung der Stromteilung im Instrumente (Fig. 32 in II, 1), rasch unempfindlicher und versagen bei sehr hohen Wechselzahlen völlig.

Der große Einfluß der Frequenz auf die Angaben aller Drehfeldinstrumente, auch des als Phasometer bezeichneten Spiegelinstrumentes für Laboratoriumszwecke ist durch die Untersuchungen Teichmüllers (ETZ 1897 Heft 37—43) an einem solchen Instrument erwiesen worden, das zwar nach erfolgter Wechselstromeichung als Voltmeter, Amperemeter und Leerstromzeiger bzw. (sin φ)-Instrument verwendbar ist, das aber eine solche Abhängigkeit von ω und der Kurvenform zeigt, daß die Kritik Teichmüllers zu seiner Verwendung für diese Größen nicht ermutigt, weshalb hier nur auf jene Arbeit verwiesen sei (vgl. auch in **17** u. **74**).

Mit größerer prozentualer Zuverlässigkeit (bis zu etwa 1 $^0/_0$) mißt man bei den meisten technischen Instrumenttypen herab bis zu etwa 1 Ampere, bei Verwendung von Zeigerinstrumenten mit feineren Hitzdrähten (Voltmetertypen) und bei Dynamometern mit vielen Windungen erweitert sich der Meßbereich bis etwa 10^{-1} Ampere, aber selbst bei Anwendung von Spiegelinstrumenten, seien es Hitzdrahtspiegelinstrumente nach Friese (ETZ 1895, 726; siehe auch die Kritik von Kollert ETZ 1902, 384) oder Ebert (1898 Wied. Ann. 65, 771) seien es Spiegeldynamometer nach O. Frölich (1871 Pogg. Ann. 143, 643) bzw. J. Fröhlich (1879 Wied. Ann. 8, 563), S. u. H. (ETZ 1881, 14), F. Kohlrausch (1882 Wied. Ann. 18, 556) wird man sich bei Stromstärken unter 10^{-2} Amp. im allgemeinen bereits mit einer geringeren Zuverlässigkeit als 1 $^0/_0$ begnügen müssen. Auch ist die Eichfähigkeit mit Gleichstrom bei den Hitzdrahtspiegelinstrumenten zwar gegeben, nicht so ohne weiteres die bei den Spiegeldynamometern. Wenigstens lassen alle älteren Instrumente, die nur vom Gleichstromstandpunkt aus konstruiert wurden, eine Nichtachtung des Einflusses der Wirbelströme und ihrer Wechselfelder erkennen und vereiteln dadurch zuverlässigere Messungen von Wechselstromstärken, namentlich bei höheren Wechselzahlen. Dieser Punkt ist bei etwaiger Benutzung von Dynamometern älterer Konstruktion, abgesehen von der an sich mühsamen Behandlung, keinesfalls zu übersehen. Ebensowenig, daß die Instrumente, welche zur Steigerung der Empfindlichkeit bis auf etwa 10^{-4} Amp. mit sehr vielen dünnen Windungen versehen sind, neben dem großen Ohmschen Widerstand so viel Selbstinduktion besitzen, daß ihre Benutzungsfähigkeit sehr beschränkt ist, weil sie bei höheren Frequenzen keinen praktisch ausreichenden Strom mehr durchlassen, wenigstens bei den ihrer Konstruktion nach anwendbaren Wechselspannungen.

Die neuesten Dynamometerkonstruktionen weisen allerdings erhebliche Verbesserungen auf, indem sie Wirbelstrombildungen, soweit praktisch erreichbar, ganz vermeiden uund so die Eichfähigkeit mit Gleichstrom sichern und auch die übrigen, bei wachsender Empfindlichkeit unvermeidlichen Schattenseiten auf ein möglichst kleines Maß zurückführen. Von den für die Praxis in erster Linie benutzbaren direktzeigenden Instrumenten mit Spiegel-

skala von H. & Br. wird so bei etwa 500 Ω innerem Widerstand und gegen 0·3 Henry Selbstinduktion noch ein Meßbereich von 0·004—0·03 Ampere erzielt, der zuverlässigere Messungen bis etwa 0·01 Amp. gestattet. Als Laboratoriumsinstrument mit Spiegelablesung erreicht die Neukonstruktion von S. & H. mit 400—500 Ω Gesamtwiderstand die Empfindlichkeit von etwa 10^{-4} Amp., doch dürfte der hohe Preis (650 Mark) erschwerend wirken. Weiteres siehe Hdb. II, 1 in **89** ff.

Dieser Erschwerung der direkten Messung sehr kleiner Wechselstromstärken entspricht auch die Schwierigkeit der Messung hoher Stromstärken. Hier ist es namentlich wieder die bei sehr hohen Stromstärken (etwa oberhalb 500—1000 Ampere) infolge einer Zunahme der erforderlichen Leitungsquerschnitte rasch anwachsende Oberflächenwirkung mit allen ihren Nebenerscheinungen, welche eine direkte Messung erschwert und als Normalinstrumente mit Gleichstromeichung neben dem unten (**7**) angeführten optischen Verfahren kaum noch das Dynamometerprinzip in Form von geeignet konstruierten Stromwagen[1]) übrig läßt. Alle übrigen Meßverfahren erfordern durch die bei Wechselstrom hinzutretenden Nebenwirkungen, sei es durch die bei Wechselstrom gegebene geometrische Zerlegung bei Stromteilungen, sei es durch die Widerstandsänderung infolge von Oberflächenwirkung, sei es durch das abweichende magnetische Verhalten von Eisenteilen oder durch Wirbelströme, eine Wechselstromeichung zur Erreichung genügender Zuverlässigkeit.

7. Indirekte Stromstärkemessung.

Indirekte Messung sehr hoher Stromstärken, welche bei Gleichstrom durch Benutzung von Normalwiderständen als Nebenschlüssen zu empfindlichen Spannungszeigern durchgehende Verwendung findet, ist bei Wechselstrom mangels hinreichend empfindlicher und zuverlässiger Spannungszeiger auch praktisch sehr beschränkt und verlangt selbst da, wo sie, wie bei Hitzdrahtmessern, innerhalb des mittleren Meßbereichs[2]) (1—500 Amp.) ausgedehnte Verwendung findet, häufige Nachprüfung und Vorsicht bei höheren Wechselzahlen (**6**).

Wichtiger ist für sehr hohe Stromstärken sowohl (über 1000 Amp.), als auch für die indirekte Ermittelung der Stromstärken in Hochspannungsleitungen die Messung mit Hilfe von Wechselinduktion (Transformation). Doch benötigen alle diese Meßvorrichtungen, die an Verwendung immer mehr zunehmen, wie die sogenannten Stromtransformatoren und der Dietze-Anleger (vgl. Seite 22) beweisen, eine empirische Wechselstromeichung und zwar bei der später zu benutzenden Periodenzahl.

Bei den ersten Ausführungen war noch eine Zusammeneichung von Transformator und Sekundärinstrument, welches eine eigentliche Stromstärke von wenigen Ampere — früher bei den S. & H. 3, neuerdings 10 Ampere — für den vollen Ausschlag benötigt, unbedingt erforderlich, sogar die Benutzung mitgelieferter Zuleitungen von bestimmtem Widerstand; neuerdings

1) Nach Prüfungen der Ph. T. R. (vgl. Z. f. J. 1904, 69) zeigte eine Stromwage für 100 Amp. nach Thomson wegen ihrer Unterteilung des Kupferquerschnitts Übereinstimmung bei Gleich- und Wechselstrom, hingegen eine Kiloamperewage ohne Unterteilung Abweichungen bis 5 %, d. h. wegen der Wirbelstromwirkungen war bei Wechselstrom für dieselbe Einstellung eine um 5 % höhere Stromstärke erforderlich als bei Gleichstrom.

2) Neuerdings sind auch solche Instrumente bis 1000 Ampere ausgeführt, doch wird bei diesen hohen Stromstärken die von den Meßinstrumenten geforderte Spannung bzw. Leistung schon in manchen Fällen Beschränkungen in ihrem Gebrauch auferlegen; meist wird man bei diesen hohen Stromstärken wohl Stromtransformatoren vorziehen.

sind aber die Stromtransformatoren in ihrer Konstruktion, namentlich ihren Streuungsverhältnissen, so verbessert worden, daß jedes in der Stromstärke (Meßbereich 10 Ampere) passende Wechselstromamperemeter verwendet werden darf, falls sein Spannungsbedarf (einschließlich der verwendeten, gleichfalls freistehenden Zuleitung) für vollen Ausschlag nicht 1·5 Volt überschreitet. Nach Angabe wären die Ablesungen am Sekundärinstrument nur mit dem Übersetzungsverhältnis des Stromtransformators zu multiplizieren, um die Primärstromstärke zu erhalten, auch soll die Phasenverschiebung zwischen den beiden Stromstärken so wenig von 180° abweichen, daß der transformierte Strom (0—10 Ampere) ohne erheblichen Fehler für Leistungszeiger und Wattmetermessungen (63 ff.) Verwendung finden darf.

Bei sehr hohen Stromstärken (über 2000 Ampere) liegt ein wesentlicher Vorteil der Verwendung von Stromtransformatoren darin, daß die Leitung

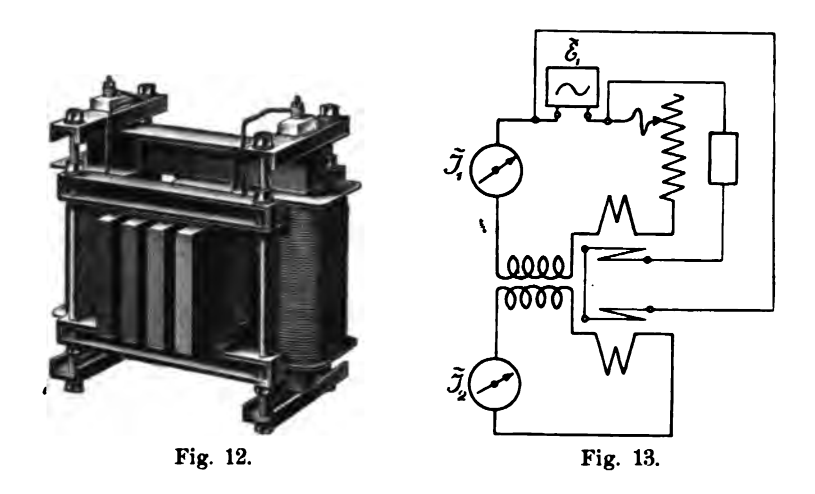


Fig. 12. Fig. 13.

nicht zur Einschaltung der Meßvorrichtung unterbrochen werden braucht, sondern der Stromtransformator, wie Fig. 12 erkennen läßt, um den stromführenden Leiter (in Fig. 12 die 4 im Querschnitt angedeuteten Stromschienen) herumgebaut wird. Dieser nur dem Wechselstrom eigentümliche Vorteil gestattet so beliebig hohe Stromstärken mit verhältnismäßig billigen Vorkehrungen (nach Preisliste von S. & H. kostet ein Stromtransformator für 12000 Ampere Primärstromstärke 165 M.) zu messen. Weiteres siehe im Abschnitt: Technische Meßinstrumente.

Will man die Nacheichung eines Stromtransformators ausführen ohne ein Normalinstrument von gleich hohem Meßbereich, z. B. einen Stromtransformator bis 3000 Ampere mit einem Dynamometer bis 400 Ampere eichen, so wird man am besten so verfahren, daß man die Eichstromstärke statt nur einmal mehrere Male durch die Öffnung des Stromtransformators hindurchführt (Fig. 12), z. B. im obigen Fall bis 8 mal. Die Nachprüfung der Phasenverschiebung zwischen beiden Stromstärken, welche für Leistungsmessungen wichtig ist, erfolgt am besten nach Schaltung von Fig. 13, d. h. mit Hilfe von 2 Wattmetern, deren Spannungsspulen durch Anlegen an dieselbe Spannung Ströme gleicher Phase erhalten, während die Hauptstromspulen in Reihe mit je einer Wickelung des Stromtransformators liegen. Aus den Wattmeterangaben $\tilde{E}_1 \cdot \tilde{J}_1 \cdot \cos\varphi_1$ und $\tilde{E}_1 \cdot \tilde{J}_2 \cdot \cos\varphi_2$ läßt sich die Differenz von $\cos\varphi_1$ und $\cos\varphi_2$ bzw. von φ_1 und φ_2 ermitteln.

Der DIETZE-Anleger (Fig. 14) ist nichts anderes als ein leicht transportabler kleiner Stromtransformator für sehr kleine Sekundärstromstärken, so daß er bei Benutzung eines Telephons als Sekundärinstrument zum Nachweis geringer Stromstärken in irgend einer als Primärleitung zangenartig vom unterteilten Eisengestell umklammerten Leitung dienen kann. Eine Messung dieser Stromstärke kann bei Ersatz des Telephons in Fig. 14 durch ein geeignetes Wechselstromvoltmeter, z. B. ein Hitzdrahtinstrument, erfolgen, ebenso seine Eichung als Amperemeter, doch gilt die Eichung nur für etwa gleiche Frequenz. (Näheres siehe ETZ 1902, 843.)

Günstig liegen die Verhältnisse für die indirekte Bestimmung sehr kleiner Stromstärken, für welche die elektrostatischen Spannungsmesser ein

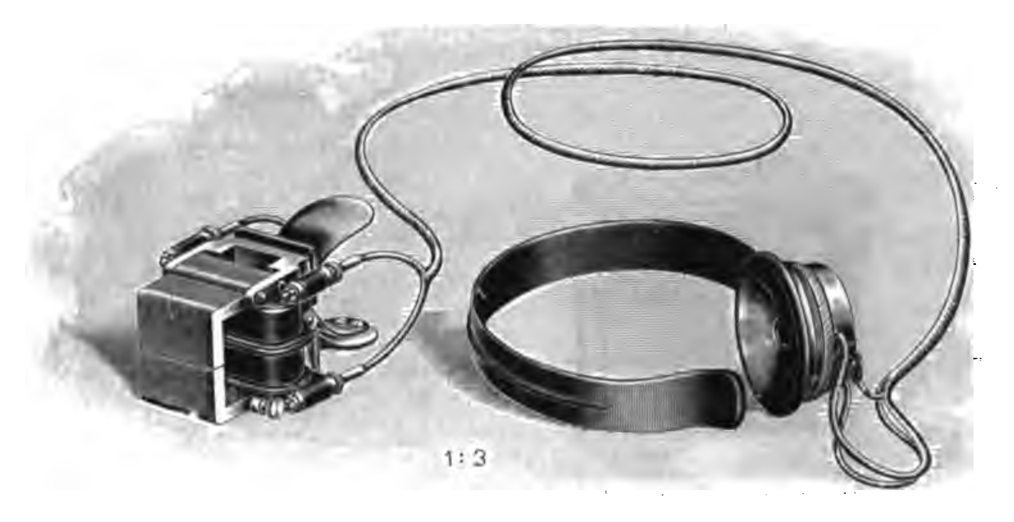


Fig. 14.

sehr wertvolles und zum Teil unersetzliches Meßmittel darstellen in Verbindung mit großen, hinreichend kapazitäts- und induktionsfrei gehaltenen Vorschaltwiderständen. Für die technischen Wechselzahlen, etwa für $\omega < 1000$, genügen hierbei die üblichen Bifilarwiderstände, während man für sehr hohe Werte von ω Lamettawiderstände oder ähnliche Ausführungen und für sehr hohe Widerstandswerte Graphitwiderstände oder KUNDTsche Widerstände vorziehen wird.

Je nach der Größenordnung der zu messenden Stromstärke wird man entweder die Parallelschaltung oder die Reihenschaltung des elektrostatischen Spannungsmessers zu dem OHMschen Widerstand mit vernachlässigbaren Nebenkoeffizienten (II, 1 in **15**) wählen. Im ersteren Fall wird man die Stromstärke in Ampere zu $\tilde{J} = \frac{\tilde{E}\,\text{Volt}}{R\,\text{Ohm}}$ bestimmen. Liegt $\tilde{E}$ in der Größenordnung 100 Volt und hat man Widerstände R bis $10^6\,\Omega$ zur Verfügung, so würden hinreichend zuverlässige Messungen bis etwa 10^{-4} Ampere reichen. Als Korrektion bzw. als Grenze der Anwendbarkeit wäre nur die Kapazität des Voltmeters und der Wert von ω zu beachten (**4**). Bei noch kleineren Stromstärken, etwa von 10^{-4} Amp. an abwärts, kann die Reihenschaltung in Verbindung mit sehr hohen Widerständen, meist Gaphitwiderständen, vorteilhafter werden.

In diesem Fall hat man die Spannung $\tilde{E}_1$ an den Enden von R und dem elektrostatischen Spannungszeiger $\tilde{E}_2$ — natürlich einschließlich der Strecke, in welcher die zu bestimmende Wechselstromstärke $\tilde{J}$ fließt — durch irgend ein zweites Voltmeter, das auch ein stromverbrauchendes Instrument sein kann aber gut mit $\tilde{E}_2$ zusammen geeicht sein muß, zu messen, wie Fig. 15 andeutet. Aus $\frac{\sqrt{\tilde{E}_1^2 - \tilde{E}_2^2}}{R}$ folgt alsdann die Stromstärke $\tilde{J}$ hinreichend genau, wenn die Differenz zwischen $\tilde{E}_1$ und $\tilde{E}_2$ nicht zu klein ist, am besten etwa im Verhältnis $\sqrt{2}$ zu 1 steht, und falls R zuverlässig genug bestimmt und frei von Nebenkoeffizienten ist.

Liegt der Zähler $\sqrt{\tilde{E}_1^2 - \tilde{E}_2^2}$, d. h. die Widerstandsspannung $\tilde{E}_R$ etwa zwischen 10 und 100 Volt und die Größe von R zwischen $10 \cdot 10^6$ und $100 \cdot 10^6$ Ω, so läßt sich sonach die Messung bis gegen 10^{-6} Ampere ausführen. Die Grenze der Zuverlässigkeit wird weniger durch die Unsicherheit von $\tilde{E}_R$ als durch die Zuverlässigkeit der Bestimmung von R bedingt sein.

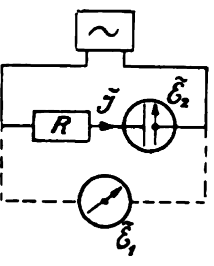


Fig. 15.

Endlich bleibt für die Ermittelung sehr kleiner Wechselstromstärken noch die Angabe $\tilde{E}$ in Volt des elektrostatischen Spannungszeigers selbst unter Hinzunahme des Wertes seiner Eigenkapazität C_V und des Wertes ω_e der Spannungswelle übrig, da die in das elektrostatische Instrument hineinfließende (Lade-) Stromstärke $\tilde{J} = \tilde{E} \cdot \omega_e \cdot C_V$. Dies setzt allerdings voraus, daß die Kurve der Kapazitätswerte C_V abhängig vom Ausschlag vorher bestimmt wird (siehe in **84**), sowie daß der Wert von $\omega_e = c_e \cdot \pi \cdot z$ hinreichend sicher bekannt ist, was für z leicht, hingegen für den Kurvenformfaktor c_e weniger leicht zu erreichen ist, wenn sich auch durch die Wahl einer passenden Maschine, bei der c_e möglichst nahe $= 1$ ist, größere Fehler werden vermeiden lassen. Am besten ist es die Bestimmung von C_V mit derselben Maschine bzw. Spannungskurve auszuführen, mit welcher die zu messende Stromstärke erzeugt wird, da alsdann bei Einsetzung von $\omega = \pi \cdot z$ in beiden Fällen der Hauptsache nach ein gegenseitiges Aufheben der Fehler von C_V und ω_e eintritt. Hat sowohl $\tilde{E}$ wie ω die Größenordnung 10^3 und C_V diejenige von 10^{-4} Mf oder 10^{-10} F, so würde auch hier eine Messung bis 10^{-6} Ampere ermöglicht sein. Für höhere Werte kann man die Ausschläge passend machen durch Parallelschaltung sehr kleiner Hilfskapazitäten C_H von bekanntem Wert zum Spannungszeiger und Einsetzung von $C_V + C_H$ in die obige Formel. Über die Bestimmung von C_H siehe in **87**.

An indirekten Bestimmungen von mittleren und höheren Stromstärken seien noch die folgenden beiden Meßverfahren angegeben, welche beide in den letzten Jahren in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt eine weitere Ausbildung erfahren haben und wegen Benutzung der Wärmewirkung der Stromstärke zur Messung auch den Vorteil besitzen, daß sie eine Gleichstromeichung zulassen, wenigstens solange keine merkliche Oberflächenwirkung bei dem zu messenden Wechselstrom zu erwarten steht.

Die eine Methode ist optischer Natur (siehe E. Orlich Z. f. J. 1904, 65) und gestattet die Stromstärkemessung, richtiger die Vergleichung übereinstimmender Effektivwerte von Wechselstrom und einem mit Kompensator gemessenen Gleichstrom mit Hilfe der Beobachtung von glühenden Platin-

blechen (beim Meßbereich 120—270 Ampere) oder Platinröhren (beim Meßbereich 120—800 Ampere) durch das optische Pyrometer von HOLBORN u. KURLBAUM, das gleiche Glühgrade sehr genau zu bestimmen erlaubt. Diese Methode besitzt in erster Linie für Normalbestimmungen oder Eichungen von Wechselstromamperemetern Bedeutung.

Die zweite Methode ist thermoelektrischer Natur, d. h. die Stromwärme des zu messenden Stromes in einem geeigneten Widerstand wird zur Erwärmung von Lötstellen einer Reihe von Thermoelementen benutzt und aus der Spannungsmessung auf die Stromstärke geschlossen. Näheres über diese anscheinend zugunsten der ersten verlassene Methode siehe S.E.V. Bd I, S. 144.

C. Wechselstromwiderstände und Wechselstromkoeffizienten.

a) Wechselstromwiderstände.

8. Allgemeines. Polarisation bei Elektrolyten.

Die Ermittelung von Ausgleichwiderständen mit Wechselstrom ist zwar in ähnlicher Weise wie bei Gleichstrom möglich, sei es daß man ohne Benutzung einer Vergleichsnormale den Wert aus der gemessenen Spannung $\tilde{E}$ und der gemessenen Stromstärke $\tilde{J}$ zu $Z = \tilde{E} : \tilde{J}$ ableitet, sei es daß man eine der zahlreichen Vergleichsmethoden, etwa die Brückenmethode, zur Anwendung bringt. Ein näheres Zusehen läßt aber erkennen, daß die Schwierigkeiten bei der Durchführung der Messung mit Wechselstrom im allgemeinen größer sind als mit Gleichstrom entsprechend der allgemeineren und komplizierteren Natur der Wechselstromerscheinungen (vgl. I, 2 in **143 ff.**).

Nicht nur, daß die Empfindlichkeit der Wechselstrommeßinstrumente es mit derjenigen der Gleichstrommeßinstrumente nicht aufzunehmen vermag. wie aus dem Vorstehenden sich ergibt, wodurch namentlich die Nullmethoden bei Wechselstrom benachteiligt erscheinen, auch die richtige Deutung der erhaltenen Meßwerte oder der Gleichgewichtsbeziehungen bietet weit größere Schwierigkeiten. Den Grund hierfür bildet der Umstand, daß bei sehr vielen Leiterbahnen nicht nur der innere Leitungswiderstand (OHMsche Widerstand oder elektrische Reibungswiderstand), wie bei stationärem Gleichstrom, sondern auch die beim Gleichstrom gleichsam latent gewordenen Feldkoeffizienten (Selbstinduktion und Kapazität) ins Spiel kommen und zuweilen so stark hervortreten können, daß jener ganz in den Hintergrund gedrängt wird.

Hieraus läßt sich im allgemeinen schon ableiten, daß die Bestimmung der OHMschen Widerstände von Leitungsstrecken bzw. ihrer Materialkoeffizienten gewöhnlich besser durch Gleichstrom, hingegen die Ermittelung ihrer Feldkoeffizienten (Selbstinduktionskoeffizient und Kapazität) besser durch Wechselstrom erfolgen wird, weil jene in Sonderheit Gleichstromkoeffizienten darstellen. Diese Regel, welche für metallisch leitende Strombahnen auch zutrifft, erleidet aber praktisch für die elektrolytisch leitenden Strecken eine Ausnahme. Diese Ausnahme wird dadurch veranlaßt, daß an den Übergangsstellen (Elektroden) der metallischen Leitung in die konvektive (Leitung durch mitgeführte Ladungen siehe I, 2 in **226 ff.**) eine Polarisationserscheinung auftritt, welche die Messung des reinen OHMschen Widerstandes solcher Strecken erschwert. Die Überwindung dieser Schwierig-

keit ist nun bei Anwendung von Wechselstrom leichter als bei Gleichstrom. Aus folgendem Grunde: Die Polarisation der Elektroden an den Enden konvektiv leitender Strecken äußert sich bei stationärem Gleichstrom in der Ausbildung einer Gegen-EMK bzw. einer Polarisationsspannung $\overline{E}_p$, welche durch die an den Elektroden ausgeschiedenen Zersetzungsprodukte bedingt wird, soweit die Elektroden vorher materiell gleichwertig waren. Bei ungleichwertigen Elektroden (Primärelementen) ist von vornherein eine solche Spannung $\overline{E}_p$ vorhanden, die bei der Zersetzung durch von außen aufgedrückten Strom aber im allgemeinen eine Veränderung erfahren wird (Ladung von Akkumulatoren).

Diese Gegenspannung $\overline{E}_p$ wird aber auch durch den Meßstrom selbst geweckt und vereitelt eine eindeutige Ermittelung von R aus der Beziehung $\overline{E}:\overline{J}$, oder aus jeder hierauf beruhenden Gleichgewichtsbeziehung bei Nullmethoden, z. B. Brückenbestimmungen. Die Trennung der Meßspannung $\overline{E}$ in die beiden Teilwerte $\overline{E}_R$ zur Überwindung des reinen Ohmschen Widerstandes R und in $\overline{E}_p$ zur Überwindung der Polarisationsspannung ist meist auch nicht annähernd möglich, weil $\overline{E}_p$ in gewöhnlich unbekannter Weise mit $\overline{J}$ und der Zeitdauer des Stromschlusses variiert. Wie unsicher der Schluß auf den wahren Wert von R ist, zeigt am besten der Fall des elektrischen Lichtbogens, wo der Streit über das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein von $\overline{E}_p$ noch immer zu keiner allgemein anerkannten Lösung geführt hat.

9. Fehlerquellen bei Flüssigkeitswiderständen und der Telephonbrücke.

Bei Flüssigkeitswiderständen liegt zwar die Sache nicht ganz so schlimm wie beim Lichtbogen, immerhin ist man allmählich immer mehr zu der Überzeugung gelangt, daß die Messung der reinen Widerstände von Flüssigkeiten, also auch ihrer Materialkoeffizienten (spez. Leitvermögen siehe I, 2 in **231**) einwandfrei besser nicht mit Gleichstrom, sondern mit Wechselstrom erfolgt, es sei denn daß es sich um sehr hohe Widerstandsbeträge (über 100 000 Ω) und um Meßspannungen (über 100 Volt) handelt, die gegenüber den auftretenden Polarisationsspannungen $\overline{E}_p$ sehr groß sind. Über die Entwickelung der Methoden der Widerstandsmessung von Elektrolyten findet sich eine erschöpfende Zusammenstellung nebst Literaturangaben in F. Kohlrausch und L. Holborn „Das Leitvermögen der Elektrolyte" Leipzig 1898 bei B. G. Teubner auf Seite 5 ff. Daselbst ist auch das in erster Linie von F. Kohlrausch entwickelte Wechselstromverfahren mit Widerstandsbrücke und Telephon eingehend behandelt.

Der durch die Polarisationsspannung $\overline{E}_p$ bedingte Fehler wird zwar bei Anwendung symmetrischen Wechselstromes von hinreichend kleiner Stärke vernachlässigbar klein gemacht werden können, vorausgesetzt, daß eine merkliche elektrische Ventilwirkung (I, 2 in **257**) vermieden wird. Dennoch können auch hier die neu hinzutretenden Wechselstromerscheinungen merkliche Abweichungen von der einfachen Beziehung und damit Fehler im Meßergebnis verursachen. Von den beiden ins Spiel tretenden Feldkoeffizienten (L und C) wird wohl der Selbstinduktionskoeffizient L der Leiterstrecke, genauer ihre Reaktanz (ωL), gegenüber ihrem Ohmschen Widerstand R fast ausnahmslos vernachlässigbar klein sein, wenn es sich um Flüssigkeitswiderstände handelt, so daß der Wechselstromausgleichwiderstand $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ praktisch ausreichend mit R zusammenfällt. Nicht so der Kapazitätswert C_p, welchen die Elektroden an der Übergangsstelle in die Flüssigkeit in Form von Polarisationskapazität darbieten (vgl. hierzu I, 2 in **261**). Der

Wechselstromausgleichwiderstand Z erfährt durch die Reihenschaltung dieser Polarisationskapazität zu dem eigentlichen OHMschen Widerstand R der Flüssigkeitsstrecke eine Vergrößerung (I, 2 in **146**) auf

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$$

und die Fehlergröße wird durch die relative Größe der Kapazitätsreaktanz $\left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)$ zu dem zu messenden Widerstand R bedingt. Anders ausgedrückt: die gemessene Spannung $\tilde{E}$ zwischen den Elektrodenenden wird nicht völlig zur Überwindung von R (als $\tilde{E}_R$-Komponente) sondern zum Teil als Ladespannungskomponente $\tilde{E}_C$ aufgebraucht. Obwohl man auch die letztgenannte Komponente als eine Art Polarisationsspannung $\tilde{E}_p$ auffassen könnte, so ist es doch hier bei Wechselstrom viel leichter möglich $\tilde{E}_R$ praktisch gleich $\tilde{E}$ zu machen wegen der geometrisch rechtwinkligen Zusammensetzung der beiden Komponenten. Um die Abweichung zwischen Z und R kleiner als $^1/_2$ % zu machen, hat man nur darauf zu achten, daß $\left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)$ in Ω, den Wert von $\frac{R}{10}$ in Ω nicht überschreitet.

Bei $\omega > 3000$, wie bei Verwendung des Telephons, soll nach den Untersuchungen von KOHLRAUSCH (a. a. O. Seite 10) bei g u t p l a t i n i e r t e n Elektroden eine Fläche von $\frac{50}{R}$ bis $\frac{100}{R} \cdot \text{cm}^2$ völlig ausreichen und auch bei $\frac{10}{R}$ bis $\frac{20}{R} \cdot \text{cm}^2$ noch ein brauchbares Tonminimum liefern. Elektroden von 1 cm² werden also bei der Messung eines Flüssigkeitswiderstandes R von 50—100 Ω noch ein scharfes, bei der Messung von $R = 10$—$20\ \Omega$ noch ein brauchbares Tonminimum im Telephon liefern, welches somit gleich als Prüfstein für die genügende Übereinstimmung von Z und R benutzt werden kann. Bei b l a n k e n reinen Platinoberflächen muß die Elektrode aber etwa 10—20 mal größer sein, da bei etwa $\frac{250}{R}$ cm² erst Resultate bis auf etwa 1 % Übereinstimmung zwischen Z und R erhalten werden, während 1 ‰ erst bei etwa $\frac{2500}{R}$ cm² erreicht wird.

10. Wirksame Wechselstromkoeffizienten.

Eine Abhängigkeit des Meßergebnisses von der Periodenzahl u oder $\omega = 2\pi u$ des zur Messung benutzten Wechselstromes liegt aber nicht nur bei Flüssigkeitswiderständen vor, sondern mehr oder weniger auch bei den Wechselstromkoeffizienten. Mit der Entwickelung der Wechselstromtechnik ist auch die Erkenntnis Hand in Hand gegangen, daß diese Koeffizienten bei den meisten praktisch vorkommenden Meßobjekten keine eigentlichen Konstanten darstellen, sondern in mehr oder weniger hohem Grade von den Meß- bzw. Betriebverhältnissen abhängen. Die Erkenntnis, daß der w i r k s a m e oder Betriebskoeffizient, z. B. $\tilde{L}$ oder $\tilde{C}$, von dem Meßergebnis, das mit einer in den Betriebsverhältnissen stark verschiedenen Meßmethode erhalten wurde, unter Umständen sehr stark abweichen kann, hat in den letzten Jahren immer mehr dazu geführt, die Meßverhältnisse bzw. -methoden soweit als möglich den Betriebsverhältnissen anzunähern, um die praktisch fast allein wichtigen wirksamen Koeffizienten zu erhalten.

Es liegt erst einige Jahre zurück, daß mir einmal ein Telegraphenrelais gebracht wurde mit dem Bemerken, daß sein Selbstinduktionskoeffizient (L) gar nicht mit dem vom Fabrikanten angegebenen Wert stimmen wolle, sondern um das Mehrfache hiervon abweiche. Es kostete einige Mühe dem Überbringer auseinanderzusetzen, daß beide Werte sehr wohl richtig gemessen sein könnten und nebeneinander bestehen, weil L bei jeder eisenhaltigen Wickelung sehr stark mit der Stromstärke variiere und eine Verschiedenheit in der Meßstromstärke sehr wohl Änderungen von L um das Mehrfache seines Betrages bedingen könne. Um ihn zu überzeugen, wurde schließlich die Messung von L nach derselben Methode aber mit einer Reihe verschiedener Stromstärken $\tilde{J}$ ausgeführt, was, wie nicht anders zu erwarten war, eine L-Kurve abhängig von $\tilde{J}$ ergab, die den Verlauf der μ_g-Kurve zeigte nach der Gleichung $L = L_1 \cdot \mu_g$, wenn L_1 den angenähert konstanten Selbstinduktionskoeffizienten der eisenfreien Wickelung bezeichnet und μ_g die (mittlere) Permeabilität des aus Eisen und Luft gemischten magnetischen Kreislaufes, welche mit der Erreger- bzw. Meßstromstärke variiert.

Aber selbst wenn diese bei Eisenkernen eigentlich selbstverständliche Variation von L mit der Stromstärke berücksichtigt wird, was aber auch heute häufig noch nicht in genügender Weise geschieht, so sind die Änderungen von L_w abhängig von dem Charakter der Stromstärke ($\bar{J}$ oder $\tilde{J}$), sowie bei $\tilde{J}$ abhängig von ω nicht zu übersehen. Solche Änderungen der wirksamen Werte sind ferner nicht nur auf den Selbstinduktionskoeffizienten ($\tilde{L}$) beschränkt, sondern treten bei allen Leiterkoeffizienten ($\tilde{M}$, $\tilde{C}$, $\tilde{R}$) auf, sobald dieselben nicht in genügender Reinheit vorliegen, was praktisch nur selten der Fall ist. Abgesehen von dem oben erwähnten Vorhandensein von Eisen in der Umgebung des Leiters, welches die stärksten Veränderungen der wirksamen Werte von Selbstinduktion ($\tilde{L}$) und Wechselinduktion ($\tilde{M}$) hervorzurufen und damit unter Umständen entsprechende Fehler oder Abweichungen zwischen Meßwert und Gebrauchswert zu veranlassen vermag, sind auch alle nichtmagnetischen Metallbahnen in der Umgebung als Variationsmomente zu beachten. Als Sitz von Sekundärströmen üben sie auf die wirksamen Koeffizienten Rückwirkungen aus, die mit ω variieren und im allgemeinen mit diesem Betriebsfaktor zunehmen, teils in einfachem, teils in quadratischem Verhältnis.

Diese Rückwirkungen bestehen nicht nur bei den Feldkoeffizienten — etwa in der Verkleinerung von $\tilde{L}$ durch parasitäre Sekundärströme in metallischen Kurzschlußbahnen an irgend einer wesentlicheren Stelle des Wechselfeldes, oder in der Verkleinerung von $\tilde{M}$ durch Schirmwirkungen solcher Metallteile — sondern auch bei dem wirksamen Leiterwiderstand $\tilde{R}$ in Gestalt der Oberflächenwirkung (I, 2 in **176**). Daß auch der wirksame Kapazitätswert $\tilde{C}$ bei festem Dielektrikum stark mit ω variieren kann, wurde gleichfalls schon früher (I, 1 in **124**) betont.

11. Wechselspannungserzeuger.

Aus diesen Überlegungen folgt die Wichtigkeit der Beschaffung einer geeigneten Wechselspannung für die Messung von Wechselstromkoeffizienten. Ferner folgt hieraus das Zurücktreten der früher vielfach, ja fast ausschließlich verwendeten Gleichstrommethoden (An- oder Abschaltung von Gleichspannung) zu derartigen Messungen. Da man schon bei der Messung die Wahl von $\tilde{E}$ bzw. ω nach Möglichkeit den späteren Betriebsverhältnissen anpassen wird, so folgt hieraus das Erfordernis einer ganzen Reihe von

Wechselspannungserzeugern, um das Gebiet der benötigten ω bzw. Periodenzahlen u ausreichend zu überstreichen.

Von den Erzeugern periodisch wechselnder Spannung würden zunächst für kleine Periodenzahlen — unterhalb der in der Technik üblichen 25—50 in der Sekunde — die mechanischen Stromwender in Frage kommen. Für reine Koeffizienten, z. B. bei Wickelungen, deren Feld eisen- und metallfrei gehalten ist und deren Leitungsquerschnitte gering oder genügend unterteilt sind, oder bei Luftkondensatoren wird die Veränderung mit ω so klein sein, daß die Untersuchung mit kleinen ω-Werten kein Bedenken besitzt. Die Anwendung zweier Stromwender auf derselben Achse (Doppelkommutatoren, Secohmmeter) gestattet nun den großen Vorteil der Benutzung von Gleichstromquellen, z. B. Akkumulatoren, als Erzeuger und der hochempfindlichen polarisierten Instrumente, z. B. Drehspulengalvanometer mit Spiegelablesung, als Nullinstrumente, da nur die 4 Brückenzweige von wechselndem Strom

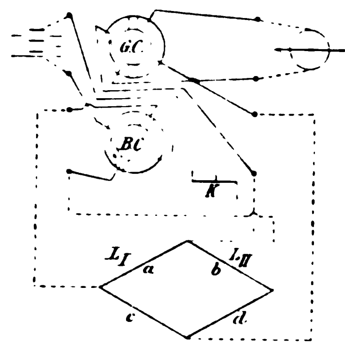



Fig. 16.


Fig. 17.

durchflossen werden, während die Einschaltung eines solchen Doppelkommutators nach dem in Fig 16 angegebenen Schema die taktmäßige Rückwandlung in gleichgerichtete Stromstöße im Galvanometerzweig zwangläufig bedingt. Die Ausführung dieser Doppelkommutatoren, ob mit Anbringung der Stromwendersegmente auf Scheiben aus Isoliermaterial (Hartgummi), die auf einer metallischen Achse befestigt werden und gegeneinander verstellbar sind nach Ayrton und Perry (vgl. Fig. 17), ob einfacher durch unmittelbare Befestigung der Segmente auf einer Walze aus Isoliermaterial nach Kollert (vgl. Fig. 18), ist für das zuerst von Helmholtz angegebene Prinzip des Doppelkommutators weniger wichtig, ebenso ob der Antrieb von Hand, oder (für höhere Werte von u bzw. ω) durch einen Motor erfolgt.

Wünscht man für eine Untersuchung sehr geringe Periodenzahlen in der Sekunde, aber ohne die plötzlichen Sprünge von Null auf die volle Spannung, wie sie den vorstehenden oder ähnlichen Stromwendern mit Erzeugung nahezu rechteckiger Spannungskurven eigen ist, so wird man einen kontinuierlichen Stromwender vorziehen, sei es in Gestalt eines Schleifdrahtwenders (vgl. Fig. 19), sei es in Gestalt eines elektrolytischen Stromwenders, wie sie meines Wissens zuerst Ewing bei seinem Hystereseschleifenzeichner (**168**) anwendete in Gestalt zweier feststehender rechteckiger und zweier rotierender ovaler Zinkplatten mit einer Zwischenschicht aus Zinkvitriollösung.

Für alle Objekte der Starkstromtechnik, wie Wickelungen von Apparaten

der Wechselstromtechnik, namentlich soweit sie eisenhaltig sind, ferner von Wechselstromkabeln usf. wird die Verwendung der Wechselstromdynamos als Erzeuger der erforderlichen Meßspannung in erster Linie in Frage kommen. Dies um so mehr als damit nicht nur die betriebsmäßig vorliegende Periodenzahl und Kurvenform am besten eingehalten, sondern auch die Abhängigkeit der Koeffizienten von der Stromstärke bzw. Spannung am besten untersucht werden kann. Im Zusammenhang mit dem letzteren Punkt steht



Fig. 18.

auch, daß man in diesen Fällen meist die absoluten Methoden (ohne Vergleichsnormale) den vergleichenden (gewöhnlich Nullmethoden) mit Vergleichsnormale vorziehen wird. Weiteres siehe in **15** und **32**.

Für alle Telephonmethoden (Nullmethoden mit Telephon als Brückeninstrument), wie z. B. Messung von Flüssigkeitswiderständen, ebenso für alle Apparate der Schwachstrom- namentlich Fernsprechtechnik ist aber die Anwendung technischer Dynamowechselspannungen teils unbequem, teils wegen der zu kleinen Werte von $\omega = 2\pi u$ ungeeignet.



Fig. 19.

Für die Erzeugung von Wechselströmen mit genügend hohen Werten von ω kommen daher für diese Untersuchungen, ebenso wie für viele der folgenden Methoden zur Bestimmung der Wechselstromkoeffizienten L und C von Strombahnen, weniger die technischen Wechselströme mit der normalen Periodenzahl von etwa 50 als vielmehr besondere kleine Erzeuger für Wechselspannungen in Frage, da die erforderlichen Stromstärken meist gering sind und selten die Größenordnung des Zehntel Ampere übersteigen, häufig sogar darunter bleiben. Neben einer genügend hohen Wechselzahl ist vielfach — namentlich dort, wo der Wert von ω in der Bestimmungsgleichung für

das Meßresultat nicht beiderseits vorkommt, also herausfällt — auf eine möglichste Annäherung der Form der Spannungskurve an die Sinuslinie, zum Mindesten aber auf Symmetrie der beiden Flächen zu beiden Seiten des Nullniveaus (I, 2 in **151**) Wert zu legen, um den Wert von ω mehr oder weniger genau aus der Wechselzahl bestimmen zu können. Der früher vielfach benutzte Sinusinduktor nach KOHLRAUSCH, gebildet durch einen rotierenden Magnet in einer flachen Wickelung von genügender Breite, ist heute meist durch einfachere und billigere Apparate verdrängt worden. Meist sind es Wellenstromerreger (I, 2 in **155**) in Verbindung mit einem kleinen Transformator (Transmitter), welcher die Wechselkomponente $\tilde{J}_I$ aus dem primären Wellenstrom $\underset{w}{J}_I$ herausfiltriert unter gleichzeitiger Umsetzung der Wechselstromenergie in höhere Wechselspannung $\tilde{E}_{II}$ und niedere Wechselstromstärke $\tilde{J}_{II}$. Diese Art der Erzeugung von passender Wechselspannung aus kleinen Gleichstromquellen (einzelnen Elementen oder Akkumulatorzellen),

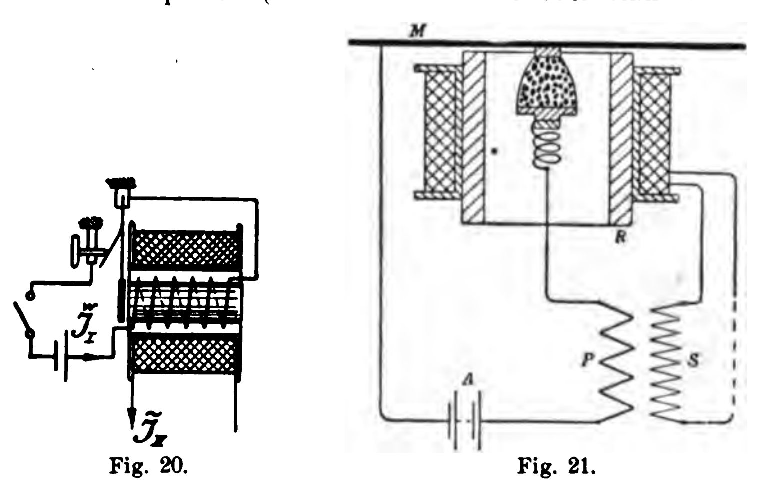


Fig. 20. Fig. 21.

wie sie Fig. 20 andeutet, ist zwar die bequemste und gestattet auch durch Benutzung des NEEFFschen Selbstunterbrechers, oder auch bei dessen Ersatz durch einen Saitenunterbrecher, wie er mehrfach, u. a. wiederum von NERNST (vgl. 1894 Z. f. ph. Ch. 14, 622) vorgeschlagen wurde, leicht genügend hohe Werte für ω zu erhalten, doch ist hier, wie auch bei allen anderen selbsttätigen „Stromunterbrechern“ mit sägezahnartigem Verlauf der Primärstromstärke $\underset{w}{J}_I$ (vgl. hierzu I, 2 in **264** und Fig. 343) der Verlauf der Sekundärspannung bzw. Stromstärke recht unsymmetrisch zum Nullniveau. Der erhebliche Unterschied zwischen dem positiven und negativen Scheitelwert kann hierbei unter Umständen zu Ventilwirkungen Veranlassung geben, die das Meßresultat beeinflussen und Abweichungen gegenüber der Anwendung von symmetrischem Wechselstrom bedingen.

Neuerdings hat man daher auch für die immer wichtiger werdenden Untersuchungen von Wechselstromkoeffizienten verbesserte Wechselspannungserzeuger für meßtechnische Zwecke ausgebildet. Neben 2 von der Ph. T. Reichsanstalt bei der Messung von Selbstinduktionskoeffizienten (vgl. E. ORLICH 1903 ETZ Heft 26) verwendeten Apparaten, einem Saitenunterbrecher nach ARONS (a. a. O. Seite 503) und einer Wechselstromsyrene sind namentlich zwei neuerdings von S. & H. auf den Markt gebrachte Apparate zu erwähnen: der Mikrophonsummer und eine kleine Zahnradinduktormaschine

zur Erzeugung von Wechselspannungen hoher Periodenzahl. Beide sind zunächst in Verbindung mit dem bequemen Hörtelephon als Brückennullinstrument gedacht, also unter Vermeidung umständlicher und schwerer zu behandelnder optischer Stromzeiger wie eines Vibrationsgalvanometers oder optischen Telephons. Bei dem Mikrophonsummer schwingt eine kreisförmige Metallmembran M (Fig. 21) vor einem magnetisierten Stahlrohr R. Durch die Schwingung wird ein in den Primärkreis P eingeschaltetes Beutelmikrophon in seinem Widerstand periodisch verändert und erzeugt als Wellenstromerreger II. Ordnung (vgl. I, 2 in 152) aus der Gleichstromquelle A (2 Akkumulatoren) einen Wellenstrom mit merklicher Wechselkomponente (etwa 0·2 Amp. $\tilde{J}$ auf 0·4 Amp. $\bar{J}$). Die Sekundärwickelung S siebt die Wechselkomponente $\tilde{J}$ heraus unter gleichzeitiger Transformation der Spannung $\tilde{E}_{II}$. Der Sekundärstrom $\tilde{J}_{II}$ ist von dem äußeren Stromkreis, der parallel zu der strichlierten Linie angelegt zu denken ist, nahezu unabhängig gemacht durch einen Nebenschluß (strichlierte Linie), der ein Minimum von $\tilde{J}_{II}$ gewährleistet und damit eine dauernde Schwingung in M. Durch Wechselinduktion wird nämlich in der um R befindlichen Spulenwickelung, die mit S in Reihe geschaltet ist, ein Strom induziert, der die Bewegung von M einleitet und periodisch den Magnetismus von R verstärkt und schwächt. Durch Aus-

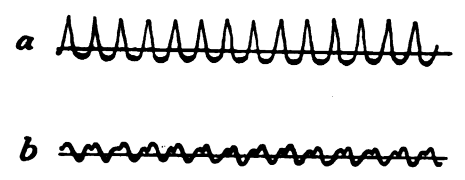


Fig. 22.

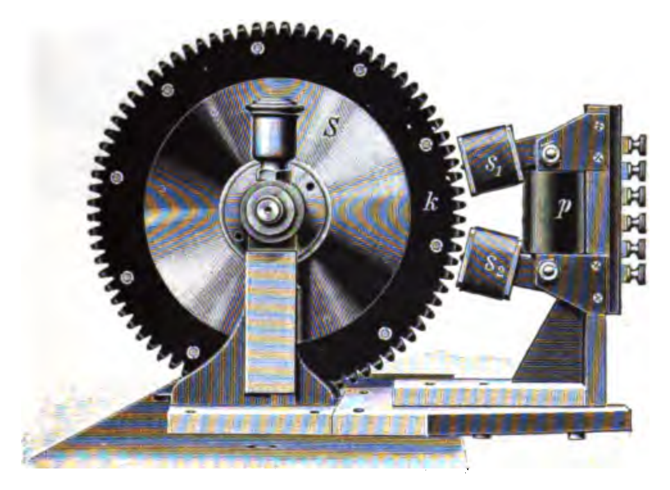


Fig. 23.

wechseln der Membran M werden Wechselströme von 300—1000 Perioden (u) in der Sekunde erzielt. Daß die Symmetrie der erhaltenen Stromkurven zum Nullniveau aber auch beim Mikrophonsummer zu wünschen übrig läßt, zeigen die beiden Oscillogramme (siehe 54—57) der Fig. 22, von denen a den Stromverlauf bei geringer Belastung zeigt, b die Stromkurvenform bei stärkerer Belastung. Über Verbesserung durch Resonanz siehe unten.

Für noch höhere Periodenzahlen bis hinauf zu $u = 6600$ in der Sekunde dient die in Fig. 23 und 24 abgebildete Zahnradmaschine. Die Gleichstromerregung eines Hufeisenjochs durch die Spule p liefert bei gleichförmig

periodischer Schwankung des magnetischen Ankerwiderstandes mit Hilfe der sehr gut unterteilten Zahnradscheibe k in den Wickelungen s_1 und s_2 die gewünschte Wechselspannung. Die Zahnradmaschine, welche etwa 15 Watt Nutzleistung zu geben vermag, ist, wie Fig. 24 zeigt, rechts und links mit einem kleinen Motor gekuppelt, doch läuft nur der eine als Antriebsmotor, während der andere als konstant belastete Dynamo zur Erhaltung möglichster Konstanz der Wechselzahl (Tourenzahl) unabhängig von kleinen Änderungen der Lagerreibung usw. auf einen regulierbaren Widerstand arbeitet.

In allen Fällen wird zur Erhaltung möglichst reiner Schwingungen, um $\omega = \pi z = 2 \pi u$ setzen zu können die Benutzung der elektrischen Spannungsresonanz (vgl. I, 2 in **146**) empfohlen. Beim Mikrophonsummer (Fig. 21) wäre daher in dem Sekundärkreis mit der Selbstinduktion von L Henry eine Kapazität von $C = \frac{10^{-6}}{\omega^2 L}$ Mikrofarad einzuschalten. Über eine Wechselstromsyrene zur Erzeugung möglichst sinusförmiger Spannungswellen von Periodenzahlen derselben Größenordnung wie jene Zahnradmaschinen siehe einen Aufsatz von M. Wien (1901 Ann. d. Ph. 4, 425).

Neben diesen Hochfrequenzmaschinen glaubt der Verfasser noch nachdrücklich auf den Wellenstromlichtbogen als bequeme und meßtechnisch

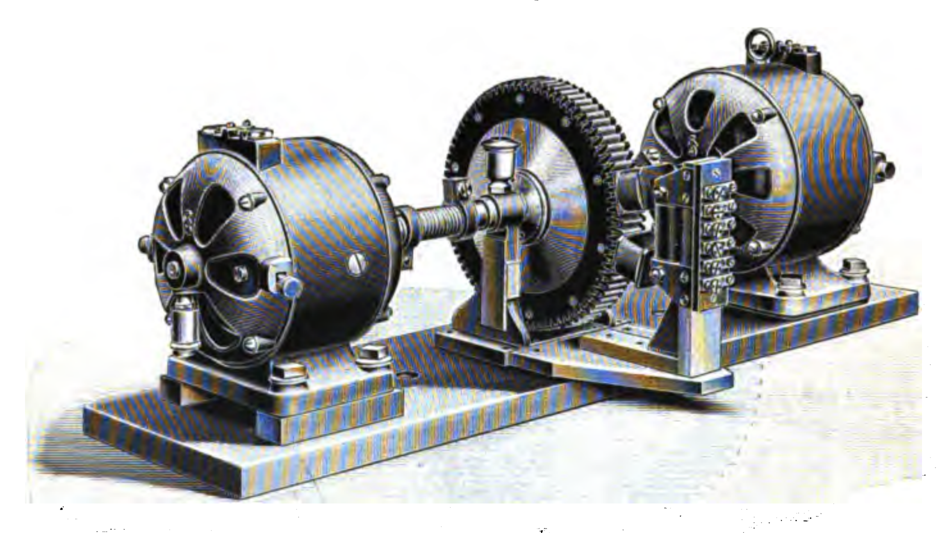


Fig. 24.

außerordentlich wertvolle Quelle zur Erzeugung hochfrequenter Wechselspannungen hinweisen zu sollen. Meine Untersuchungen am Wellenstromlichtbogen (Z. d. V. z. B. d. G. 1904 Heft 10) haben mich die Benutzung dieser Wechselspannungsquelle wegen ihrer bequemen Beschaffbarkeit und ihres weiten Bereichs — hauptsächlich zwischen 1000 und 100 000 Perioden in der Sekunde, aber auch noch darüber und darunter — schätzen gelehrt. An dieser Stelle wäre sie nicht nur als wertvoller und leistungsfähigerer Ersatz für die vorgenannten Apparate, sondern auch namentlich deshalb anzuführen, weil sie die bisher klaffende weite Lücke zwischen den Periodenzahlen der zuletzt genannten Wechselspannungserzeuger und den Periodenzahlen der sog. Tesla-Schwingungen nahezu ausfüllt und zwar in einer Form, welche sie den intermittierenden, gedämpften und meßtechnisch nur sehr unvollkommen zugänglichen

TESLA-Schwingungen weit überlegen erscheinen läßt, da der Bogenlampenwechselstrom einen dauernden Strömungs- bzw. Schwingungsvorgang darstellt, dessen Dämpfung wegen der raschen stetigen Erneuerung der Energie aus der Gleichstromquelle praktisch nicht merkbar wird. Wie bereits früher (I, 2 in **266**) angegeben, bedingt die Parallelschaltung einer Kapazität zu einem kurzen Gleichstromlichtbogen mit Homogenkohlen das Entstehen einer symmetrischen, periodischen Wechselströmung in diesem Parallelkreise. Über die Anordnung vgl. auch diesen Band in **123** (Fig. 229). Durch Hinzuschalten passender Beträge von Selbstinduktion in Reihe mit jener Kapazität kann man nicht nur mit Hilfe von Spannungsresonanz die Wechselspannung, sondern, was meßtechnisch noch wichtiger ist, die Periodenzahl u bzw. den Wert $\omega = 2\pi u$ auf bequeme Weise in weiten Grenzen (vgl. oben) variieren, sowie den Wert von $\omega_i = \frac{\tilde{E}_L}{\tilde{J} \cdot L}$ auf einfache Weise hinreichend genau bestimmen, indem man neben der Stärke des Wechselstromes $\tilde{J}$ im Schwingungskreise noch die Spannung $\tilde{E}_L$ — am besten mit Hitzdrahtvoltmeter — an den Enden einer eisen- und (im Felde) metallfrei gehaltenen Selbstinduktionsspule mit dem anderweitig bestimmten Koeffizienten L mißt. Weiteres siehe in **24** und **35**.

Reichen auch diese Periodenzahlen noch nicht aus, wie dies wohl für bestimmte physikalische Untersuchungen der Fall sein könnte, oder für die

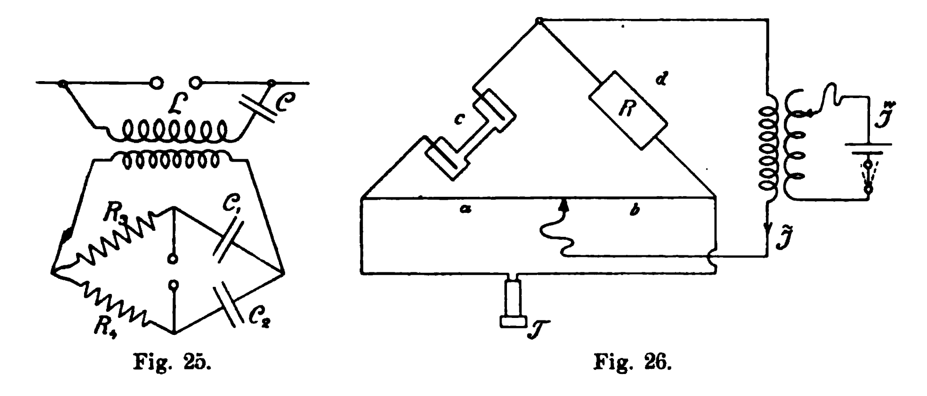


Fig. 25. Fig. 26.

Ermittelung der wirksamen Koeffizienten von Anordnungen, die für die drahtlose Telegraphie Anwendung finden sollen, so muß man zur Benutzung eines Schwingungskreises nach TESLA bzw. THOMSON (vgl. I, 2 in **206**) greifen. Die Benutzung dieser Schwingungen für Meßzwecke, wie sie nach einem Vorschlage von NERNST (1895 Wied. Ann. 60, 600) etwa Fig. 25 mit der Brückenschaltung andeutet, wird namentlich zur Untersuchung der Oberflächenwirkung oder zur Vergleichung der wirksamen Werte von Kapazitäten in Frage stehen, doch versagen hier die sonst üblichen Brückeninstrumente und es bleibt nur die Verwendung einer (weniger empfindlichen) Funkenstrecke als Nullinstrument bestehen. Auch die Bestimmung von ω ist nicht direkt, sondern nur indirekt auf Grund der Schwingungsformel möglich und daher weniger zuverlässig. Überhaupt ist die Deutung der Funkensprache weniger einfach und die Verwendung dieser hohen Periodenzahlen für Meßzwecke noch einer weiteren Ausbildung für allgemeinere Benutzung bedürftig.

Flüssigkeitswiderstände mit Wechselstrom.

Für die Bestimmung OHMscher Widerstände mit Wechselstrom kommen praktisch in erster Linie, wie schon oben (**9**) ausgeführt, elektrolytische Leiterstrecken, besonders flüssige Elektrolyte in Frage. Hierbei wird es sich bald um die Ermittelung des elektrischen Gesamtwiderstandes einer gegebenen Anordnung, z. B. einer Flüssigkeitszelle, in Ohm handeln, bald um die spezifische Leitfähigkeit einer Flüssigkeit, z. B. zwecks Berechnung des Dissoziationsgrades oder eines ähnlichen, chemisch wichtigen Zustandes der Flüssigkeit (vgl. I, 2 in **232** ff.).

Fast ausnahmslos pflegt hierfür die Methode der Telephonbrücke Anwendung zu finden, bei der (Fig. 26) die beiden Zweige a und b als homogener Gleitdraht ausgebildet sind, während der Vergleichswiderstand R in d für die in c eingeschaltete Flüssigkeitszelle aus einem Rheostat mit möglichst kleinen Nebenkoeffizienten (II, 1 in **15**) gebildet wird. Das Verschwinden des Tones im Telephon T beim Verschieben des Gleitklotzes auf dem Brückendraht ab zeigt das Wechselstromgleichgewicht an:

$$Z_c : Z_d = Z_a : Z_b$$

Für vernachlässigbar kleine Nebenkoeffizienten geht dies über in

$$R_c : R_d = R_a : R_b.$$

Die Polarisation in c als Fehlerquelle läßt sich durch hinreichend groß gewählte Elektroden vernachlässigbar klein machen (vgl. in **9**). Für mittelgroße Widerstände R_c, etwa zwischen 50 und einigen Tausend Ohm bietet eine genaue Bestimmung von R_c keine erheblichen Schwierigkeiten, so daß man darauf zu achten hat, daß man für die elektrische Widerstandsermittelung gegenüber der Temperaturbestimmung der Flüssigkeit — wegen der großen Temperaturkoeffizienten der Flüssigkeiten ist Zuverlässigkeit auf mindestens Zehntel Celsiusgrade notwendig — und gegenüber der erreichbaren Bestimmung der chemischen Zusammensetzung keine unnötig hohe Zuverlässigkeit anstrebt. Je kleiner R_c wird, desto größere Aufmerksamkeit ist der Polarisation als in Reihe geschalteter Kapazität zuzuwenden; je größer R_c wird, desto größere Beachtung verdienen die Fehler durch Kapazitäten, die als Parallelschaltungskapazitäten zu den Zweigen c bzw. d aufgefaßt werden können. Diese können 2 Ursachen haben: entweder kann die Flüssigkeitszelle c, wenn sie sich in einem Bade befindet (zur Konstanthaltung der Temperatur) eine merkliche resultierende Kapazität gegenüber d besitzen, gebildet durch die Glaswände als Dielektrikum, die beiderseitigen leitenden Flüssigkeiten als Belege; oder die in d benutzten großen Beträge Bifilarwiderstand haben eine die Parallelschaltungskapazität C_c überwiegende resultierende Kapazität C_d (II, 1 in **16**).

In beiden Fällen deckt sich das Wechselstromgleichgewicht nicht mit dem Gleichgewicht der OHMschen Widerstände. Dies bewirkt stetig wachsende Unsicherheiten in der Bestimmung oder Fehler. Der Ton bzw. Strom im Telephon wird an keinem Punkte Null, sondern es ergibt sich günstigen Falles ein Tonminimum, für welches die obige Beziehung noch hinreichend gilt. Dies wird aber immer verwaschener und unsicherer, je weniger das Verhältnis der Kapazitäten der Brückenzweige mit dem Verhältnis der OHMschen Widerstände zusammenfällt.

Zum besseren Verständnis dieser etwas verwickelten Erscheinungen, welche aber praktisch sehr wichtig sind, da sie beim Zusammenwirken mehrerer Leitungskoeffizienten (R, C, L) stets in ähnlicher Weise wieder-

kehren, sei auf Folgendes hingewiesen: Trägt man die Stromstärke bzw. Tonstärke in dem Brückenzweig als Ordinaten zu den Ausgleichwiderstandsverhältnissen (als Abscissen) auf, so ist diese Beziehung bei Wechselstrom nicht durch eine einfache (parabelähnliche) Kurve mit Minimum darstellbar, sondern bei praktisch merkbaren Beträgen zweier Koeffizienten, z. B. R und C, ergibt sich eine Fläche, die nur ein absolutes Minimum, aber viele relative besitzt. Denken wir uns also in Fig. 27 die Brückenstromstärke $\tilde{J}$ als y Ordinate zu den Verhältnissen $R_c : R_d$ als x Koordinaten und den Verhältnissen $C_c : C_d$ als z Koordinaten aufgetragen, so geht die doppelt gekrümmte Fläche für $\tilde{J}$ bei verschwindendem Einfluß der Kapazitäten in die einfach gekrümmte Mulde mit einer parabelähnlichen Kurve in der x, y-Ebene als Querschnitt über, weil die Krümmung in der y, z-Ebene in eine Grade übergeht. Für den Wert x, der der Beziehung $R_c : R_d = R_a : R_b$ entspricht — $R_a : R_b$ als feststehend gedacht —, wird die x-Achse berührt, d. h. $\tilde{J}$ zu Null und ein scharfes Einstellen ermöglicht.

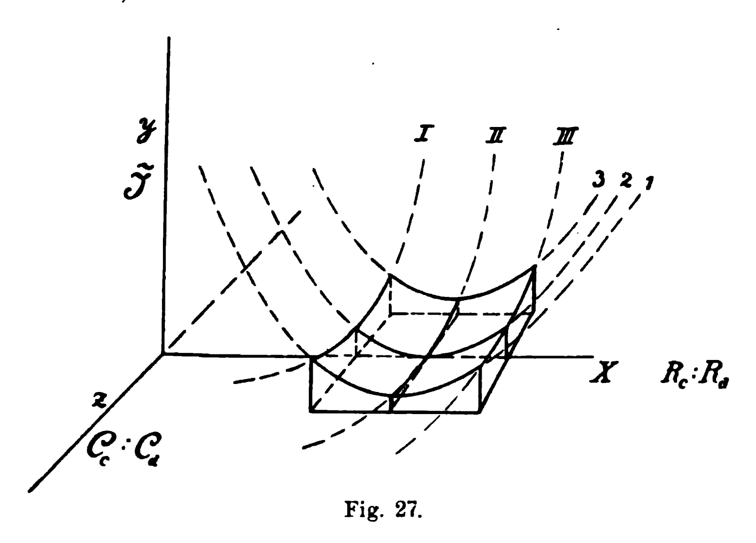


Fig. 27.

Kommen aber die Kapazitäten ins Spiel, so entsteht für $\tilde{J}$ die doppelt gekrümmte Fläche und zwar wird die Krümmung in der y, z-Ebene um so stärker, je größer der Einfluß der Kapazitäten gegenüber den Ohmschen Widerständen wird. Hieraus folgt, daß das absolute Minimum ($\tilde{J} = o$) im allgemeinen nicht erreichbar ist, es müßte denn gleichzeitig die Beziehung bestehen $R_c : R_d = R_a : R_b$ und $C_c : C_d = R_a : R_b$, was aber so gut wie nie von selbst zutreffen wird.

Beim Überwiegen des einen Koeffizienten, z. B. R, gegenüber dem anderen, etwa $\frac{1}{\omega \cdot C}$ (vgl. in 9), läßt sich aber das scharfe Minimum erreichen, wenn man zuerst ein relatives Minimum einstellt, indem man etwa durch Veränderung von $R_a : R_b$ auf der Kurve 3 entlang rutscht bis zum Schnittpunkt 3 II; hierauf durch Veränderung des Verhältnisses von $C_c : C_d$, etwa durch Parallelschalten einer veränderlichen kleinen Hilfskapazität zum Zweige d bzw. auch c, was auszuprobieren ist, das Minimum von $\tilde{J}$ verbessert, indem man sich auf der Kurve II entlang bewegt bis zum Schnittpunkt II, 2, d. h. dem absoluten Minimum. Als veränderliche kleine

Hilfskapazitäten verwendet man am einfachsten ein paar verschiebbare Metallplatten, entweder durch Luft oder auch durch eine Glasplatte getrennt.

Dieses Verfahren der zweimaligen Minimumeinstellung ist praktisch in allen Fällen von großer Wichtigkeit, wo 2 Leitungskoeffizienten in Frage kommen, also auch bei L und R, wie noch weiter unten (**21**) gezeigt werden soll. Hier sei aber zunächst über die Auswertung der so erhaltenen Flüssigkeitswiderstände in Richtung der spezifischen Leitvermögen noch das Nötige hinzugefügt. Die Umrechnung des in der Telephonbrücke erhaltenen Wertes $R_c = R_d \cdot \frac{R_a}{R_b}\,\Omega$ nach der Formel $R_c = \frac{l}{q \cdot k}$ in die Leitfähigkeit $k = \frac{l}{q \cdot R_c}$ wird praktisch gewöhnlich auf Schwierigkeiten stoßen, weil der Verlauf der Stromfäden eine zuverlässige Bestimmung der Dimensionswerte l und q meist vereiteln wird, da hier die Verhältnisse viel ungünstiger zu liegen pflegen als bei metallischen Leiterbahnen (vgl. I, 2 in **175**). Man hilft sich in diesem Falle durch Benutzung einer passenden Normalflüssigkeit, z. B. gesättigter Kochsalzlösung, gewöhnlich in Verbindung mit der Anwendung möglichst handlicher Tauchelektroden.

Für besser leitende Flüssigkeiten muß man dafür sorgen, daß l groß genug und q klein genug ausfällt, um geeignete Widerstandswerte (vgl. in **9**) zu bekommen, etwa unter Anwendung von Gefäßen, wie sie Fig. 28 andeutet. Für schlechte Leiter wird man Tauchelektroden nach Fig. 29 vorziehen.

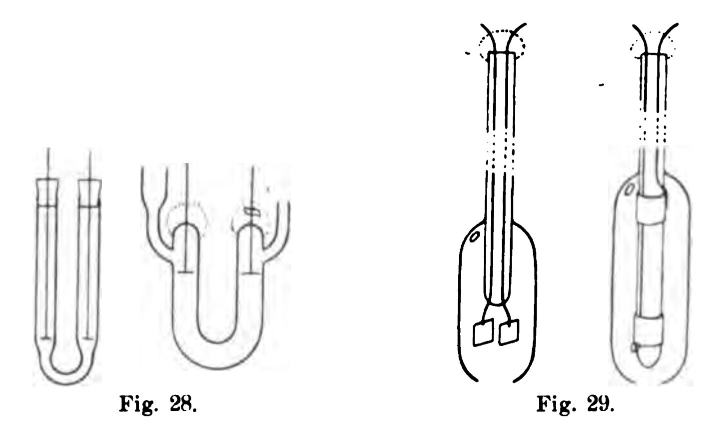


Fig. 28. Fig. 29.

(Weiteres über Tauchelektroden und Gefäße siehe bei Kohlrausch & Holborn a. a. O. Seite 12 bis 21.) In beiden Fällen verfährt man so, daß die dem benutzten Gefäß eigentümliche Widerstandsgröße γ oder das Verhältnis der reduzierten Dimensionen $l_r : q_r$ mit Hilfe einer Normallösung von genau bestimmter Temperatur und Konzentration zunächst nach der Gleichung $R_n = \gamma : k_n$ oder $\gamma = R_n \cdot k_n$ ermittelt wird. Benutzt man z. B. gesättigte reine Kochsalzlösung als Normalflüssigkeit, so ist der Wert von k_n auf Ohm bezogen (vgl. hierzu I, 2 in **209** und in **232**) bei 18° C

$$k_{18} = 0{\cdot}2161 \cdot 10^{-4}\,\mho\,\left(\frac{m}{mm^2}\right)$$

mit dem in der Telephonbrücke, wie oben angegeben, zu $R_n\,\Omega$ ermittelten Wert zu multiplizieren, um jenen Gefäßfaktor γ — gewöhnlich, wenn auch leicht irreleitend, mit der wenig passenden Benennung „Widerstandskapazität" belegt — zu erhalten.

Wird nach sorgfältigem Auswaschen des Gefäßes und nach erneuter Füllung mit der zu untersuchenden Flüssigkeit x der Widerstandswert R_x in Ω in der Telephonbrücke ermittelt, so folgt

$$k_x = \gamma : R_x \text{ in } \mho\left(\frac{m}{mm^2}\right).$$

Über die weitere Verwertung von k in Richtung der Ionenhypothese und ihrer Begriffe siehe I, 2 in **229 ff.**

18. Wirksame Wechselstromwiderstände metallischer Leiter.

Wenn auch der OHMsche Widerstand metallischer Leiter im allgemeinen stets mit Gleichstrom ermittelt werden wird, so kommen doch auch Fälle vor, in denen gerade der wirksame Leiterbahnwiderstand $\tilde{R}$ bei Wechselstrom bzw. sein Unterschied gegenüber dem (OHMschen) Gleichstromwiderstand $\overline{R}$ von Interesse ist, wie er sich auf Grund der Oberflächenwirkung (Hautwirkung vgl. Hdb. I, 2 in **176** bis **178**) ergibt. Der starke Einfluß, welchen der Wert von ω auf diesen Unterschied $R_\vartheta = \tilde{R} - \overline{R}$ besitzt, geht aus den daselbst entwickelten Formeln ohne weiteres hervor und wird bei dem bekanntesten TESLA-Experiment, der im Nebenschluß zu einem dicken Kupferdrahtbügel brennenden Glühlampe, besonders augenfällig gemacht. Hieraus folgt, daß die Messung dieser Vergrößerung bzw. von $\tilde{R}$ nur mit einem Wechselstrom von etwa gleichgroßem ω erfolgen kann. Es sei aber sogleich hier bemerkt, daß die genauere Messung von R_ϑ, auch wohl als Verlustwiderstand bezeichnet, nur verhältnismäßig selten durchführbar ist und bei dem gegenwärtigen Stand der Meßtechnik und der Wechselstrommeßinstrumente vielfach auf nicht zu überwindende Schwierigkeiten stößt. Mit erklärt wird dies durch den Umstand, daß prozentual merkliche Beträge von R_ϑ erst bei höheren Werten von ω auftreten und alsdann auch die Nebenkoeffizienten und zwar hier besonders der Selbstinduktionskoeffizient L der untersuchten Leiterstrecke stark, ja meist weit stärker als R_ϑ in die Erscheinung tritt und die Spannungsverhältnisse beeinflußt. Eindeutig läßt sich daher R_ϑ oft nur aus der Vergrößerung der JOULEschen Wärme um den Betrag $\tilde{J}^2 \cdot R_\vartheta \cdot T$ über die Gleichstromwärme $\overline{J}^2 \cdot R \cdot T$ bei gleicher Effektivstromstärke J feststellen, doch sind diese Messungen höchst subtil (vgl. I, 2 in **178**). Günstiger liegen die Verhältnisse bei Leiterbahnen, welche höhere Stromstärken $\tilde{J}$ vertragen und so große Leistungen $\tilde{W}$ absorbieren, daß deren Messung mit dem Wattmeter zuverlässig erfolgen kann.

In diesem Falle wird man $\tilde{R}$ als den Leistungswiderstand bei Wechselstrom (I, 2 in **142** mit R_w bezeichnet) zu

$$\tilde{R} = \frac{\tilde{W}}{\tilde{J}^2}$$

durch Messung von $\tilde{W}$ und $\tilde{J}$ ermitteln und durch Vergleich mit $\overline{R} = \overline{E} : \overline{J}$ — nebenbei auch zur Feststellung des Einflusses der Nebenkoeffizienten auch mit $\tilde{Z} = \tilde{E} : \tilde{J}$ — auf R_ϑ schließen können. Allerdings schließt der so ermittelte Wert von $\tilde{R}$ neben der Vergrößerung von $\overline{R}$ durch die Oberflächenwirkung auch noch alle Verluste ein, welche im „Felde" des Leiters durch Wirbelstrombildung, Ummagnetisierung und Umelektrisierung auftreten, deren Abtrennung in vielen Fällen nicht leicht sein wird, so daß man sich in diesem Falle mit einem einheitlichen Leistungswiderstand $\tilde{R}$ bei Wechselstrom begnügen muß.

Als Beispiel einer solchen Ermittelung von $\tilde{R}$ sei auf die Messung an einem verseilten Drehstromkabel (Schachtkabel) und deren Auswertung im

obigen Sinne hingewiesen (vgl. hierzu Nachrichten der S.S.W. Heft 7 Dez. 1905 Seite 176). Durch eine Kurzschlußmessung mit einer Meßanordnung, die der später (**107**) in Fig. 214 angegebenen entsprechend ist, wurden die Werte links vom Doppelstrich beobachtet. Unter Zuhilfenahme des aus einer Anzahl Einzelmessungen mit Gleichstrom folgenden Mittelwertes von $\overline{R}_1 = \overline{E}:\overline{J} = 0{\cdot}351\,\Omega$ pro Ader und der rechts vom Doppelstrich berechneten Werte folgt ein Verhältnis von etwa 1·04 für $\tilde{R}:\overline{R}$ oder für R_δ der Wert von etwa 0·04 $\overline{R}_1$. Alle Messungen von $\tilde{R}$ erfolgten mit $u = 50$ Perioden.

$\tilde{E}$ Volt	$\tilde{J}$ Amp.	$\tilde{W}$ Watt	$3\,\tilde{R}_1 = \tilde{W}:\tilde{J}^2$ in Ω_w	$3\,\overline{R}_1$ Ω	$\tilde{Z}_1 = \tilde{E}:\tilde{J}\sqrt{3}$ in Ω_s
25·5	40·5	1795	1·095	1·053	0·364
28·2	44·7	2186	1·093		
42·9	67·9	5008	1·085		

Aus diesen Zahlen folgt, daß ein merklicher Unterschied zwischen $\tilde{Z}_1$ und $\tilde{R}_1$ nicht besteht, also die Nebenkoeffizienten bei diesem 3fach verseilten Schachtkabel von etwa 700 m Länge und 3×35 mm² Kupferquerschnitt bei den Betriebsverhältnissen, welche bei der Messung vorlagen (vgl. hierzu I, 2 in **145**), nicht merklich auf die Ausgleichverhältnisse einwirken, wie auch zu erwarten, daß hingegen eine Vergrößerung des Leitungswiderstandes $\tilde{R}_1$ gegenüber $\overline{R}_1$ in dem Verhältnis von etwa $\frac{1{\cdot}092}{1{\cdot}053}$, d. h. um etwa 3·8 % stattfindet. Weiteres über die Bestimmung von wirksamen Widerständen $\tilde{R}$ bei Maschinen und Transformatoren siehe in **88** und **107**.

Bei Leiterbahnen mit merklich hervortretenden Nebenkoeffizienten ist eine weitere Möglichkeit zur Ermittelung von R_δ bei mäßig hohen ω-Werten durch Ausscheidung des Einflusses von L mit Benutzung einer variablen Hilfsnormale der Selbstinduktion und der doppelten Minimumeinstellung (**12**) gegeben. Diese gegenwärtig wohl am meisten verwendete Brückenmethode mit Telephon würde also durch Aufsuchen des „scharfen" Minimums, unter Variation der Verhältnisse von L und von $\tilde{R}$, für beide Koeffizienten das durch die Gleitdrahtlängen $a:b$ angegebene Gleichgewichtsverhältnis bei Wechselstrom herstellen. Hierauf sind unter Ersatz der Wechselstromquelle durch eine Gleichstromquelle und des Telephons durch ein empfindliches Galvanometer die Gleichgewichtsverhältnisse bei Gleichstrom für dasselbe $a:b$ zu ermitteln, was R_δ in Ω liefert. Die Ausführung einer solchen Messung nebst Zahlenbeispiel sei aber erst später (**23**) angeführt, da sie praktisch meist in Verbindung mit und im Anschluß an die Bestimmung der Selbstinduktionskoeffizienten jener Spulen bzw. Leiterstrecken erfolgen wird. Es sei jedoch sogleich an dieser Stelle erwähnt, daß dieses Verfahren im allgemeinen nicht die absoluten Werte von R_δ liefern wird, sondern entsprechend seinem Charakter als Vergleichsmethode die resultierenden Werte von R_δ bezogen auf den Vergleichswiderstand bzw. die Vergleichsnormale von L. Nur wenn diese so sorgfältig unterteilt wären, daß bei ihnen der „Verlustwiderstand" praktisch gleich Null gesetzt werden könnte, würde das ermittelte R_δ mit dem absoluten Wert zusammenfallen. Auch für die weitere Entwickelung der Bestimmungsmethoden für $\tilde{R}$ dürfte die Erzeugung hochfrequenter Wechselströme mit Hilfe des Wellenstromlichtbogens (**11**) ein wertvolles Hilfsmittel bieten.

b) Selbstinduktionskoeffizienten.

α) Allgemeines und Messung ohne Vergleichsnormale.

14. Definition des Selbstinduktionskoeffizienten.

Die Leitungskoeffizienten, welche durch das magneti che Feld eines Stromleiters bedingt werden, unterscheidet man in Selbstinduktionskoeffizienten und Wechselinduktionskoeffizienten. Unter dem Selbstinduktionskoeffizienten L einer Leitungsstrecke versteht man die Kraftlinienwindungen (Produkt aus Kraftlinienzahl N im einfachen Windungsquerschnitt und Zahl der Windungen w, welche von N durchsetzt werden,) bei der Stromstärke 1, so daß sich L durch die Gleichung definiert (vgl. I, 2 in **182**)

$$L = \frac{N \cdot w}{J},$$

während das Verkettungsprodukt $N \cdot w$, bzw. allgemeiner unter Berücksichtigung der inneren oder relativen Streuung $\sum_1^w N_1 \cdot w_1$ (vgl. I, 1 in **106**) ein Maß für die elektromagnetische Bewegungsgröße $L \cdot J$ liefert, welche dem mechanischen Bewegungsmoment $M \cdot v$ entspricht.

Diese Definition für L gilt zwar allgemein, bleibt aber nur so lange eindeutig, als die im Nenner stehende Stromstärke J die Kraftlinienbildung d. h. die Erzeugung des im Zähler stehenden Kraftlinienfeldes N verursacht. Bei Wechselstrom $\tilde{J}$ ist dies aber nur bei Wickelungen mit eisen- und metallfrei gehaltenen Feldern richtig. In allen übrigen Fällen, welche praktisch überwiegen, wird sich die gemessene Stromstärke $\tilde{J}$ in 2 Komponenten zerlegen lassen, von denen die eine ($\tilde{J}_r$) als arbeitleistende Komponente durch Leistungen im Felde (Hysterese, elektrische Leistungen in Sekundärkreisen mit Hilfe der Wechselinduktion) gebunden oder kompensiert wird, während die andere, im Kreisdiagramm zu $\tilde{J}_r$ senkrecht stehende, wattlose oder Magnetisierungskomponente $\tilde{J}_\mu$ für die Bildung des Wechselfeldes $\tilde{N}$ übrig bleibt. Je nachdem sich nun $\tilde{J}_\mu$ der Größe nach der Meßstromstärke $\tilde{J}$ annähert, wie etwa bei Drosselspulen und beim leerlaufenden Transformator, oder aber nur einen kleinen Bruchteil von $\tilde{J}$ bildet, wie etwa beim induktionsfrei vollbelasteten Transformator, wird der Wert von L für dieselbe Leiterstrecke sehr verschieden ausfallen, je nachdem man die Komponente $\tilde{J}_\mu$ oder die volle Meßstromstärke $\tilde{J}$ in die obige Gleichung einführt.

Um hier von vornherein eine weitverbreitete begriffliche Verwirrung bezüglich des Begriffes Selbstinduktion bei eisenhaltigen und gleichzeitig mit Wechselinduktion behafteten Stromkreisen zu vermeiden, muß man eine Unterscheidung in einen ideellen oder reinen (L_μ) und in einen resultierenden oder wirksamen Selbstinduktionskoeffizienten (L_w) vornehmen und definieren

$$L_\mu = \frac{\sum_1^w \tilde{N}_1 \cdot w_1}{\tilde{J}_\mu}$$

$$L_w = \frac{\sum_1^w \tilde{N}_1 \cdot w_1}{\tilde{J}} \cdot \sin \varphi_I = \frac{\tilde{E} \cdot \sin \varphi}{\tilde{J} \cdot \omega_i}$$ (siehe hierzu in **16**).

Da weiterhin $\tilde{J}_\mu = \tilde{J} \cdot \sin \varphi_I$ (vgl. Fig. 35) so folgt hieraus, daß

$$L_\mu \cdot \sin \varphi_I = \frac{L_w}{\sin \varphi_I} \text{ oder } L_w = L_\mu \cdot (\sin \varphi_I)^2$$

Bei eisenhaltigen Stromkreisen ist ferner darauf zu achten, daß eine Abhängigkeit des Wertes $L = \frac{N \cdot w}{J}$ von der Eisensättigung oder der Änderung des magnetischen Widerstandes des magnetischen Kreislaufes besteht, so daß auch der ideelle Selbstinduktionskoeffizient L_μ keine Konstante, sondern eine Funktion der Stromstärke, hier $\tilde{J}_\mu$, ist und abhängig von $\tilde{J}_\mu$ aufgetragen den Verlauf der Permeabilitätskurve μ_g des ganzen Kreislaufes zeigt nach der Gleichung (siehe oben in **10**)

$$L_\mu = L_1 \cdot \mu_g.$$

Auch hier ist weiterhin der Einfluß von ω des zur Messung benutzten Wechselstromes zu berücksichtigen, da hiervon die Stärke der Wechselinduktionen und auf Grund der Schirmwirkung der Wirbelströme im Eisen (vgl. I, 2 in **306**) auch die Feldbildung, sowie auch das Verhältnis der beiden Komponenten $\tilde{J}_r$ und $\tilde{J}_\mu$ beeinflußt wird, Umstände, die namentlich bei höheren Werten von ω (oberhalb der technischen Wechselzahlen) zu bedenken sind, um grobe Fehler bei den Werten $\tilde{L}$ der wirksamen Selbstinduktionskoeffizienten zu vermeiden.

Werden diese grundlegenden Unterscheidungen bei der Ermittelung von Selbstinduktionswerten genügend beachtet, so kann man die Meßmethoden einteilen in absolute und in Vergleichsmethoden.

15. **Messung eindeutiger Werte von L. Kurvenformfaktor.**

Bei der Ableitung des L-Wertes einer Leiterstrecke, meist einer Wickelung, aus der Bestimmung mehrerer zeitlich zusammengehöriger elektrischer Wechselstromgrößen ohne Zuhilfenahme einer Induktionsnormale oder auch ihres reziproken Ersatzes, d. h. einer Kapazitätsnormale (vgl. I, 2 in **149**), wird man nach dem Vorausgegangenen zunächst meßtechnisch zu unterscheiden haben in Wickelungen mit praktisch eisen- und metallfreien Feldern und in Wickelungen mit Eisenkernen, geschlossenen Sekundärbahnen u. dgl.

Im ersten und einfacheren Fall genügt eine gleichzeitige Messung von ω_i des Betriebsstromes und seiner Stärke $\tilde{J}$ in der Wickelung und der Spannung $\tilde{E}$ an ihren Enden nach dem Schema der Figur 30, sowie eine nachträgliche Bestimmung des Ohmschen Widerstandes R der Spule bei derselben Temperatur, um den hier eindeutigen Wert L nach der Gleichung

$$\frac{\tilde{E}}{\tilde{J}} = Z = \sqrt{R^2 + (\omega_i \cdot L)^2} \text{ zu } L = \frac{1}{\omega_i} \cdot \sqrt{\left(\frac{\tilde{E}}{\tilde{J}}\right)^2 - R^2}$$

berechnen zu können.

Als Korrektionsglieder kommen bei der Schaltung der Fig. 30 gegebenenfalls der Widerstand R_a und der Selbstinduktionskoeffizient L_a des benutzten Amperemeters in Betracht. R_a wäre zu R hinzuzufügen, während L_a von dem errechneten L abzuziehen wäre. Gewöhnlich benutzt man aber zur Messung von $\tilde{J}$ Hitzdrahtinstrumente, bei denen L_a vernachlässigbar klein ist und auch die Berücksichtigung von R_a meist keine merkliche Änderung des Ergebnisses bewirkt. Über die graphische Behandlung der Korrektionsglieder, welche durch die Meßschaltung selbst verursacht werden, d. i. Spannungsabfall $\tilde{J} \cdot R_a$ bei eingeschlossenem Amperemeter (Fig. 30), oder Stromverbrauch $\tilde{J}_V$ des Voltmeters bei ausgeschlossenem Amperemeter siehe in **16** Fig. 36 a und b. Die Grenze der Zuverlässigkeit pflegt gewöhnlich durch die Unsicherheit der Bestimmung von $\omega_i = \pi \cdot z = 2\,\pi\,u$ bedingt zu sein, für den meist vorliegenden Fall, daß nur die sekundliche Wechselzahl z bzw. Periodenzahl u, etwa durch einen Frequenzmesser, gemessen

und Sinusform der Stromwelle angenommen wird, d. h. der Abweichungsfaktor c_i von der Sinuswelle ohne Bestimmung der wahren Kurvenform gleich 1 gesetzt wird (siehe hierzu am Schluß dieses Artikels).

Stellt man die obige Gleichung $\tilde{E} = \tilde{J} \cdot Z = \tilde{J}\sqrt{R^2 + (\omega_i \cdot L)^2}$ im Kreisdiagramm dar (Fig. 31), so erkennt man, daß bei Wickelungen mit eindeutigem Selbstinduktionskoeffizienten, der gleichzeitig praktisch nahezu unabhängig ist von der benutzten Stromstärke $\tilde{J}$ und Polargeschwindigkeit ω_i (vgl. I, 2 in **176**), kein Unterschied besteht zwischen $\tilde{J}$ und $\tilde{J}_\mu$, daß hingegen die gemessene Spannung $\tilde{E}$ eine Zerlegung erfahren muß, in die beiden Komponenten: $\tilde{E}_R = \tilde{J} \cdot R$ zur Überwindung des OHMschen Widerstandes (Strömungswiderstand in der Leiterbahn) und in $\tilde{E}_L = \tilde{J} \cdot \omega_i \cdot L$ zur Überwindung der Selbstinduktion (Trägheitswiderstand des magnetischen Wechsel-

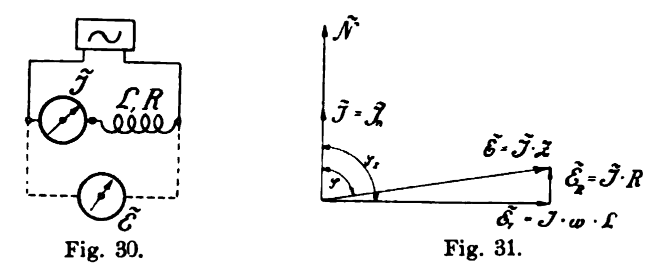


Fig. 30. Fig. 31.

feldes). Nur bei den Wickelungen der Starkstromtechnik ist R zuweilen gegenüber $\omega \cdot L$ so klein, daß ohne großen Fehler $\tilde{E} = \tilde{E}_L$ gesetzt werden kann, nicht aber bei Leitern mit kleinen Leitungsquerschnitten, weshalb die

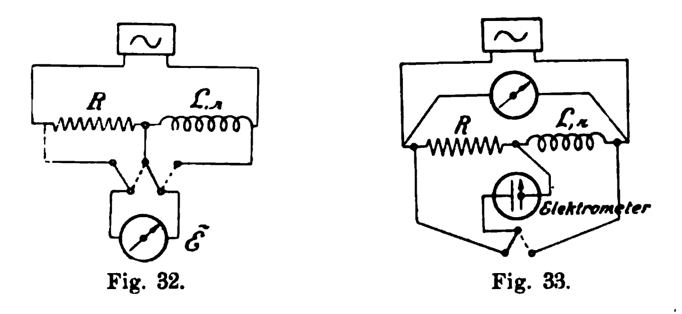


Fig. 32. Fig. 33.

mit Gleichstrom erfolgende Ermittelung von R als Hilfsgröße neben L sich nicht umgehen läßt.

Der Wert von φ_I (vgl. in **14**) ist sonach hier stets 90^0 und somit $L_w = L_\mu$, da $(\sin \varphi_I)^2 = 1$ wird.

Ist die Wickelung, wie bei manchen Schwachstromapparaten oder auch bei Selbstinduktionsnormalen, derart, daß sie keine so hohen Stromstärken $\tilde{J}$ verträgt, wie sie für die direkte Messung wünschenswert sind, oder wünscht man mit einem Spannungsmesser allein auszukommen, so kann man dies durch die Schaltung der Fig. 32 erreichen, indem man vor die Spule mit dem zu messenden L und bekannten OHMschen Widerstand r einen reinen OHMschen Widerstand R (ohne erhebliche Nebenkoeffizienten) in Reihe schaltet und die Teilspannungen mit Hilfe eines geeigneten Spannungszeigers — am besten eines elektrostatischen Voltmeters — mißt. Aus den beiden Bestimmungsgleichungen

$$\tilde{E}_R = \tilde{J} \cdot R$$
$$\tilde{E}_L = \tilde{J}\sqrt{r^2 + \omega_i^2 \cdot L^2}$$

folgt dann zunächst allgemein

$$L = \left(\frac{\tilde{E}_L}{\tilde{E}_R}\right) \cdot \frac{1}{\omega_i}\sqrt{R^2 - r^2}$$

Macht man weiterhin R variabel und verändert R so lange bis $\tilde{E}_L = \tilde{E}_R$, d. h. die beiden Teilspannungen genau gleich werden, so wird das Resultat von den Spannungen ganz unabhängig und man erhält die einfache Beziehung

$$L = \frac{1}{\omega_i} \cdot \sqrt{R^2 - r^2},$$

wobei vielfach r^2 gegenüber R^2 noch so klein sein wird, daß man es vernachlässigen kann und hinreichend genau $L = \frac{R}{\omega_i}$ setzen kann.

Diese einfache Beziehung ist z. B. von Rosa & Grover (1905 Bureau of Standards, Washington, Druckschrift Nr. 2) nach dem Schaltungsschema der Figur 33 zur absoluten Bestimmung der L-Werte von Selbstinduktionsnormalen benutzt worden. Für diese Zwecke mußte der Hauptschwerpunkt der Untersuchung in einer hinreichend genauen Bestimmung des Wertes ω_i der Polargeschwindigkeit liegen, da die ausreichend zuverlässige Bestimmung von R und r bei Beachtung des Temperatureinflusses verhältnismäßig leicht auszuführen war, ebenso die Bedingung eines verschwindend kleinen Ladestromes im Elektrometernebenschluß (**4**).

Bezeichnet man den Korrektionsfaktor der Wellenform, wie er aus der Abweichung der Stromstärkekurve ($\tilde{J}$) von der Sinusform sich ergibt, mit c_i und setzt

$$L = \frac{1}{c_i \cdot \pi \cdot z}\sqrt{R^2 - r^2}$$

so folgt aus der Beziehung

$$\tilde{J}^2 = \tilde{J}_1^2 + \tilde{J}_3^2 + \tilde{J}_5^5 + \text{usf.}$$

wenn $\tilde{J}$ den gemessenen Effektivwert und $\tilde{J}_1, \tilde{J}_3, \tilde{J}_5$ usf. die Harmonischen oder Komponenten der Stromstärke $\tilde{J}$ bezeichnen (vgl. hierzu in **61**),

$$\tilde{E}_R^2 = R^2 (\tilde{J}_1^2 + \tilde{J}_3^2 + \tilde{J}_5^5 + \ldots)$$
$$\tilde{E}_L^2 = \tilde{J}_1^2 [r^2 + (\pi \cdot z)^2 \cdot L^2] + \tilde{J}_3^2 [r^2 + 9 (\pi \cdot z)^2 \cdot L^2] + \tilde{J}_5^2 [r^2 + 25 (\pi \cdot z)^2 \cdot L^2] + \ldots$$

$$\text{oder} \quad \frac{1}{c_i} = \sqrt{\frac{\tilde{J}_1^2 + \tilde{J}_3^2 + \tilde{J}_5^5 + \ldots}{\tilde{J}_1^2 + 9\,\tilde{J}_3^2 + 25\,\tilde{J}_5^2 + \ldots}}$$

Wäre z. B. bei $\tilde{J} = \tilde{J}_1 \sin(\pi \cdot z \cdot t - \varphi_1) + \tilde{J}_3 \sin(3\pi \cdot z \cdot t - \varphi_3) + \tilde{J}_5 \sin(5\pi \cdot z \cdot t - \varphi_5) + \tilde{J}_7 \sin(7\pi \cdot z \cdot t_1 - \varphi_7) + \tilde{J}_9 \sin(9\pi \cdot z\, t - \varphi_9)$ zu setzen $\tilde{J}_1 = 100$; $\tilde{J}_3 = 2$; $\tilde{J}_5 = 2$; $\tilde{J}_7 = 1$; $\tilde{J}_9 = 1$ so wäre

$$\frac{1}{c_i} = \sqrt{\frac{100^2 + 2^2 + 2^2 + 1^2 + 1^2}{100^2 + 9 \cdot 2^2 + 25 \cdot 2^2 + 49 \cdot 1^2 + 81 \cdot 1^2}} = 0{\cdot}9875$$

d. h. die Abweichung von 1 und der Fehler ohne Rücksicht auf c_i 1·25 %. Für $\tilde{J}_7 = 5$ und $\tilde{J}_9 = 5$ also bei starkem Hervortreten dieser höheren Harmonischen würde $\frac{1}{c_i} = 0{\cdot}8668$ d. h. der Fehler bereits 13·3 %.

So große Abweichungen werden allerdings für gewöhnlich kaum auftreten wie folgende beiden Erfahrungswerte zeigen. Bei einer sehr stark verzerrten Welle einer Ganz-Wechselstrommaschine fand H. F. Weber 6·8 % Abweichung des c_i von der Einheit. Die in Figur 34 dargestellte und von Rosa untersuchte Welle eines Westinghousegenerators, welche wie die meisten modernen Nutenmaschinen die höheren Harmonischen, hier die fünfte, dreizehnte und fünfzehnte stark hervortreten läßt und eine scheinbar stark von der Sinuswelle abweichende Welle der EMK liefert, ergibt nach der Analyse:

$$\tilde{E}_e = 30{\cdot}66 \sin(x - 0^0 56') + 0{\cdot}80 \sin(3x - 6^0 17') - 1{\cdot}65 \sin(5x - 14^0 22')$$
$$+ 0{\cdot}40 \sin(9x + 7^0 50') + 1{\cdot}11 \sin(13x - 30^0 45') - 1{\cdot}18 \sin(15x - 38^0 40')$$

und einen Faktor $\frac{1}{c_i} = 0{\cdot}9933$, der nur 0·67 % von 1 abweicht. Weiteres über die Ermittelung von ω und namentlich der Kurvenformen siehe in **51 ff.**

16. **Verfahren bei eisenhaltigen oder sekundär belasteten Stromkreisen.**

Die Fälle, bei denen nichts von der einer Wickelung zugeführten elektrischen Leistung im Felde verbraucht wird, sind aber bei Wechselstrom praktisch ziemlich selten; meist liegen Wickelungen mit Eisenkernen und damit Hystereseverluste vor, häufig auch die Übertragung von Leistung durch das Wechselfeld auf Sekundärkreise, seien es parasitäre in Form von Wirbelströmen, seien es solche mit gewollter oder nutzbarer Transformierung. In allen diesen Fällen muß eine Zerlegung der gemessenen Stromstärke stattfinden und diese verlangt, da sie der rechnerischen Konstruktion aus $\tilde{E}$, $\tilde{J}$, R und ω_i wie im vorhergehenden Fall (Fig. 31) nicht zugänglich ist, die Messung des Leistungsfaktors oder der äquivalenten Phasenverschiebung zwischen $\tilde{E}$ und $\tilde{J}$, meist mit Hilfe einer Wattmetermessung zu

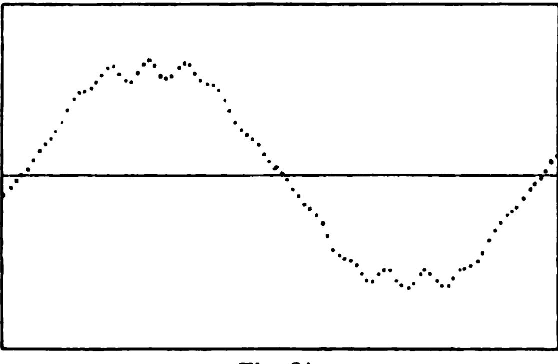


Fig. 34.

$$\cos\varphi = \frac{W}{\tilde{E} \cdot \tilde{J}}.$$

Die Durchführung der erforderlichen Leistungsmessung wird, wie später (**62 ff.**) näher ausgeführt, meßtechnisch ein verschiedenes Vorgehen bedingen, je nachdem es sich um größere Leistungen W (von einigen Watt aufwärts) handelt, bei denen die Verwendung von Wattmetern, namentlich der direktzeigenden möglich ist, oder um sehr kleine Leistungen (Bruchteile eines Watt), wie häufig bei Schwachstromwickelungen, wo indirekte Verfahren, etwa die Leistungsbestimmung aus 3 Spannungsmessungen am Platze sind, falls nicht ein Spiegelwattmeter (**63**) zur Verwendung gelangt. Im ersteren Fall tritt zu der Schaltung der Figur 30 noch das Wattmeter hinzu, wie Fig. 134 bis 136 in **63** angibt; im letzteren Fall kann bzw. muß das Amperemeter zur Messung von $\tilde{J}$ fortfallen und wird durch eine indirekte Stromstärkebestimmung aus induktionsfreiem Widerstand und Spannungsmessung zwischen seinen Enden ersetzt, wie Fig. 140 oder 141 in **66** angibt.

In beiden Fällen dient die Leistungsmessung nur dazu, eine richtige

Zerlegung von $\tilde{E}$ und $\tilde{J}$ vornehmen und daraus die beiden in **14** unterschiedenen Selbstinduktionskoeffizienten berechnen zu können, d. i. der — praktisch in der Regel weniger interessierende — ideelle Selbstinduktionskoeffizienten

$$L_\mu = \frac{\tilde{E}_I}{\omega_i \cdot \tilde{J}_\mu} = \frac{\sum_1^w \tilde{N}_1 \cdot w_1}{\tilde{J}_\mu}$$

und der — praktisch meist wichtigere — wirksame (resultierende) Selbstinduktionskoeffizient

$$L_w = \frac{\tilde{E} \cdot \sin \varphi}{\tilde{J} \cdot \omega_i} = \frac{\tilde{E}_I \cdot \sin \varphi_I}{\tilde{J} \cdot \omega_i} = \frac{\sum_1^w \tilde{N}_1 \cdot w_1}{\tilde{J}} \cdot \sin \varphi_I = L_\mu \cdot (\sin \varphi_I)^2.$$

Die Ableitung beider aus den gemessenen Werten $\tilde{E}$, $\tilde{J}$ und φ läßt sich am besten am Kreisdiagramm der Fig. 35 ersehen. Trägt man die um den Winkel φ abstehenden Meßwerte $\tilde{E}$ in Volt und $\tilde{J}$ in Ampere nach Wahl eines beliebigen aber passend gewählten Maßstabes für Volt und Ampere auf, so liefert die Messung des Ohmschen Widerstandes $\tilde{R}_I\,\Omega$ — streng ge-

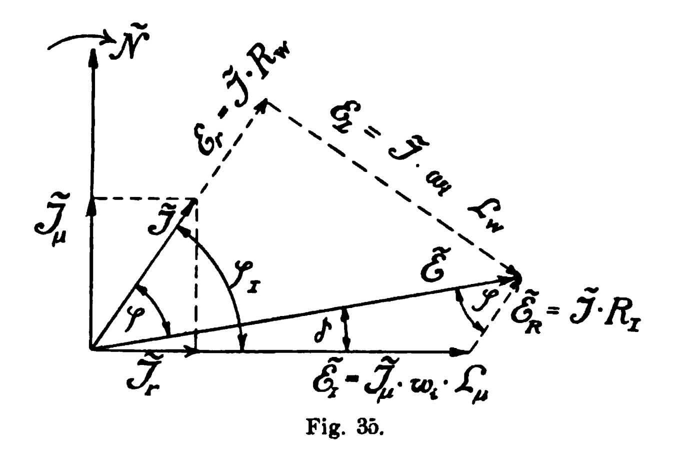


Fig. 35.

nommen der durch die Oberflächenwirkung etwas vergrößerte Wechselstromwert $\tilde{R}_I$ (siehe in **13** und **107**) — den Spannungsfall $\tilde{E}_R = \tilde{J} \cdot R$ Volt in der Wickelung der Größe nach. Wird dieser unter dem Winkel φ an $\tilde{E}$ angetragen, so ist als Rest die Umsetzungsspannung $\tilde{E}_I$, welche durch das Wechselfeld $\tilde{N}$ kompensiert wird, in Größe und Richtung gegeben. Hierdurch ist weiterhin das zu $\tilde{E}_I$ senkrechte Wechselfeld $\tilde{N}$, sowie die Zerlegung von $\tilde{J}$ in $\tilde{J}_r = \tilde{J} \cdot \cos \varphi_I$ und $\tilde{J}_\mu = \tilde{J} \cdot \sin \varphi_I$ gegeben und endlich aus

$$\tilde{E}_I = \tilde{N} \cdot w \cdot \omega_e = L_\mu \cdot \tilde{J}_\mu \cdot \omega_i$$

$L_\mu = \frac{\tilde{E}_I}{\omega_i \cdot \tilde{J}_\mu}$ Henry, wenn $\tilde{E}$ in Volt, $\tilde{J}$ in Ampere und ω_i als sekundliche Polargeschwindigkeit eingesetzt wird.

Für die analytische Formulierung liefert das Kreisdiagramm der Fig. 35 weiterhin $\varphi_I = \varphi + \delta$, wobei δ gegeben ist durch

$$\sin \delta = \frac{\tilde{E}_R \cdot \sin \varphi}{\tilde{E}_I} = \frac{\tilde{E}_R \cdot \sin \varphi}{\sqrt{\tilde{E}^2 + \tilde{E}_R{}^2 - 2\,\tilde{E} \cdot \tilde{E}_R \cos \varphi}}.$$

Bedeutend einfacher ist die Ableitung des wirksamen Selbstinduktionskoeffizienten, da hierzu nur die Zerlegung der Meßspannung $\tilde{E}$ in eine

Komponente in Richtung von $\tilde{J}$ und eine senkrecht hierzu erforderlich ist. Aus der letzteren folgt ohne weiteres

$$L_w = \frac{\tilde{E}_L}{\tilde{J} \cdot \omega_i} = \frac{\tilde{E} \cdot \sin \varphi}{\tilde{J} \cdot \omega_i}$$

Hieraus kann man auch mit Benutzung des Wertes von φ_I unmittelbar $L_\mu = L_w \cdot \frac{1}{(\sin \varphi_I)^2}$ berechnen.

Wegen des oben erwähnten Einflusses von ω empfiehlt es sich, den Wert von ω bei der Messung nicht gar zu verschieden von dem Betriebs-ω zu wählen. Um die Abhängigkeit des L von der Stärke des Meßstromes zu untersuchen, müßte die Messung bei gleichem ω, aber bei verschiedenen Werten von $\tilde{J}$ bzw. $\tilde{J}_\mu$ durchgeführt werden; anderenfalls darf man nicht vergessen, bei einer Einzelbestimmung die Stärke des benutzten Meßstromes anzugeben.

Die Meßschaltungskorrektionen, welche durch den Spannungsabfall $\tilde{J} \cdot \tilde{R}_A$ in den vom Voltmeter mit eingeschlossenen Instrumentwiderständen R_A be-

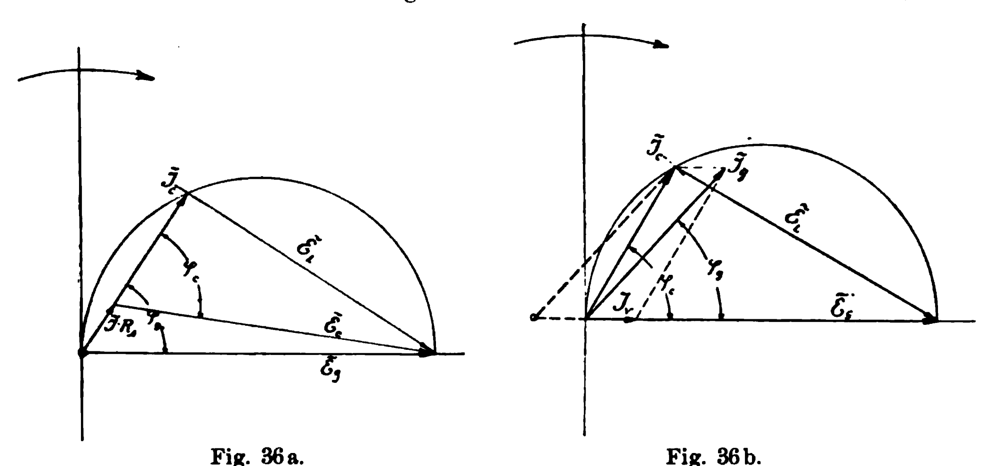


Fig. 36a. Fig. 36b.

dingt werden, zeigt in graphischer Behandlung Fig. 36 a, wo der Deutlichkeit halber der Unterschied zwischen der gemessenen Spannung $\tilde{E}_g$ und der korrigierten $\tilde{E}_c$, bzw. zwischen der gemessenen Phasenverschiebung φ_g und der korrigierten φ_c größer gewählt wurde als den praktischen Verhältnissen gewöhnlich entspricht. Für ein Voltmeter oder allgemeiner für Spannungskreise mit dem Stromverbrauch $\tilde{J}_V$, der von dem nicht mit eingeschlossenen Amperemeter in $\tilde{J}_g$ mitgemessen wird, zeigt Fig. 36 b die graphische Ermittelung der korrigierten Stromstärke $\tilde{J}_c$ bzw. Phasenverschiebung φ_c. Weiteres über diese graphischen Korrektionen siehe bei den Wattmetermessungen in **63** Fig. 136.

β) Vergleichsmethoden.

17. Anwendung von Vergleichsmethoden.

Bei Schwachstromwickelungen bietet die absolute Bestimmung von Selbstinduktionskoeffizienten oft so große Schwierigkeiten, daß man Vergleichsmethoden vorzieht. Dies wird namentlich der Fall sein, wenn die anwendbaren Stromstärken und Spannungen klein, ihre zuverlässige Messung also sehr erschwert, wenn nicht unmöglich wird, oder wenn eine genügend zuverlässige Bestimmung von ω_i zu große Schwierigkeiten macht und die Er-

mittelung aus dem Spannungsdreieck (**66**) zu große Unsicherheiten einschließt. In allen diesen Fällen bieten die Vergleichsmethoden eine wertvolle Ergänzung zu, bzw. einen wünschenswerten Ersatz für die absoluten Bestimmungen, da sie die Anwendung kleiner Spannungen und Stromstärken gestatten und in den meisten Fällen von der Kurvenform unabhängig sind, also die Unsicherheit in dem Werte $\omega_i = c_i \cdot \pi \cdot z$, namentlich die beim Kurvenfaktor c_i unschädlich machen. Hierzu kommt, daß die Ausbildung von Selbstinduktionsnormalen in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht hat (II, 1 in **17**), so daß die Meßergebnisse nach dieser Richtung zuverlässiger geworden sind, und eine Steigerung in der Verwendung der Vergleichsmethoden namentlich in Gestalt der Wechselstrombrücken die Folge gewesen ist. Allerdings scheint hier die Übertragung auf eisenhaltige Wickelungen nicht immer mit der nötigen Vorsicht und Einschränkung auf die benutzte Stromstärke erfolgt zu sein. Die Verallgemeinerung des erzielten Meßresultates wird aber in solchen Fällen gewöhnlich zu beträchtlichen Fehlern bzw. Abweichungen zwischen Meßwert und Gebrauchswert Veranlassung geben (vgl. hierzu in **14**). Die Zahl der möglichen Vergleichsmethoden ist eine sehr große, so daß auch hier eine Auswahl getroffen wurde. So möge z. B. die Vergleichung von Selbstinduktionskoeffizienten mit Hilfe des Phasometers (vgl. **6**) trotz gewisser Vorzüge dieser Laboratoriumsmethode hier durch den Hinweis auf die Arbeit Teichmüllers (ETZ 1897, 663) erledigt sein, da der Bau und die Anwendung derartiger Phasometer bisher in die Meßtechnik keinen Eingang gefunden hat, was wohl auf die früher (**6**) erwähnte Kritik der Eigenschaften dieses Instrumentes zurückzuführen ist.

18. Brückenmethode mit Doppelkommutator.

Bei eisenfreien Wickelungen und eindeutigen Selbstinduktionskoeffizienten, welche von der Größe des ω-Wertes praktisch unabhängig sind, wird man im Laboratorium vorteilhaft rotierende Doppelkommutatoren, sowie Akkumulatoren als Stromquelle und ein hochempfindliches Spiegelgalvanometer als Nullinstrument bei der früher (in **11** Fig. 16) angegebenen Brückenschaltung verwenden.

Die Vergleichung zweier Selbstinduktionskoeffizienten, z. B. des bekannten Wertes L_a der Normale mit dem gesuchten Koeffizienten L_x der in den Brückenzweig b (Fig. 37 a) eingeschalteten Wickelung, beruht allgemein auf dem Herstellen sowohl des Gleichstromgleichgewichts als auch des Wechselstromgleichgewichtes. Bestehen beide nebeneinander, so erhält man die beiden Bestimmungsgleichungen, wenn a, b, c und d zugleich die Ohmschen Widerstände angeben:

Für Gleichstrom ist $a : b = c : d$,

für Wechselstrom gilt $Z_a : Z_b = Z_c : Z_d$,

oder nach Auflösung der Wechselstromwiderstände Z in die einzelnen Glieder und Faktoren

$$\sqrt{a^2 + (\omega L_a)^2} : \sqrt{b^2 + (\omega L_b)^2} = c : d$$

unter der Voraussetzung, daß die Zweige c und d der Brücke aus induktionsfreien Widerständen gebildet sind.

Die Auflösung und Vereinigung beider Beziehungen liefert

$$\omega^2 L_a^2 \cdot d^2 = \omega^2 L_b^2 \cdot c^2$$

also unter Fortfall des Wertes von ω, d. h. unabhängig von ihm,

$$L_a : L_b = c : d = a : b, \text{ oder, da } L_b = L_x,$$

$$L_x = L_a \cdot \frac{b}{a} = L_a \cdot \frac{d}{c} \cdot$$

Die Durchführung der Abgleichung wird sich verschieden gestalten, je nachdem man eine veränderliche Normale oder eine unveränderliche Normale für L_a benutzt.

19. Messung mit veränderlicher Normale.

Bei Benutzung einer innerhalb nicht zu enger Grenzen variabler Normalen für L_a wird man c und d am besten aus einem kombinierten Gleitdraht, d. h. einem Meterdraht von 1 Ω Widerstand mit beiderseits anschließendem bifilaren Stöpselwiderstand, wählen, sowie außerdem noch einen Stöpselwiderstand zwischen a und b einschalten, so daß er rasch und bequem entweder dem Zweig a, oder dem Zweig b zugeschaltet werden kann, wie Fig. 40 zeigt.

Zuerst wird angenähert Gleichstromgleichgewicht in der Brücke hergestellt bei r u h e n d e m Doppelkommutator, aber l e i t e n d e r V e r b i n d u n g der Punkte 1 und 2 mit der Stromquelle (Akkumulatoren vgl. Fig. 16), der Punkte 3 und 4 mit dem Galvanometer, dessen Empfindlichkeit am besten variabel gemacht (II, 1 Fig. 24) und anfangs klein gewählt wird. Läßt man hierauf den Doppelkommutator gehen, so verschwindet das Gleichgewicht bzw. der Zeiger aus der Nullstellung, und man hat nun durch Variation des Wertes von L_a o h n e Änderung der Gleichstromwiderstände, d. h. durch Drehen bzw. Verschieben der beweglichen Wickelung der Normale innerhalb der

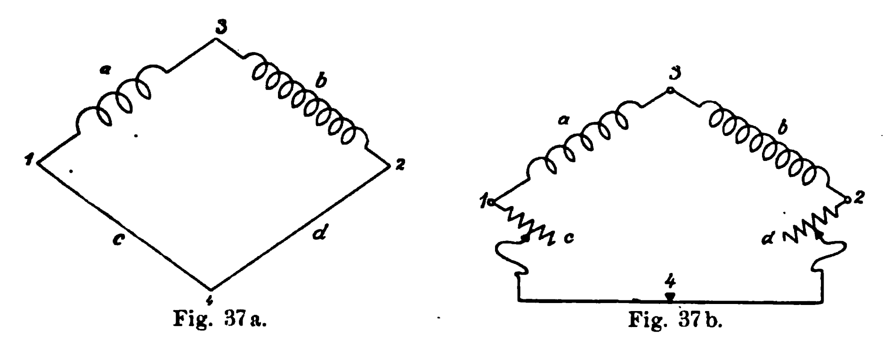


Fig. 37 a. Fig. 37 b.

zulässigen Grenzen den Zeiger wieder auf Null zu bringen. Gelingt dies nicht, so reicht keiner der verfügbaren Werte von L_a aus, um mit dem gewählten Verhältnis $\frac{b}{a}$ bzw. $\frac{d}{c}$ multipliziert den vorliegenden Wert von L_x zu erreichen.

Es muß nun das Verhältnis $\frac{b}{a}$ und $\frac{d}{c}$ so lange abgeändert werden, bis n e b e n dem erneuert hergestellten Gleichstromgleichgewicht auch das Wechselstromgleichgewicht erreichbar ist. Für das Endresultat werden beide mit voller Empfindlichkeit des Galvanometers abgeglichen, wobei für das Wechselstromgleichgewicht auch unter Benutzung zweier g a n z e r Skalenteilwerte L_a' und L_a'' zu beiden Seiten des genauen Bezugswertes L_a das Interpolationsverfahren Anwendung finden kann.

20. Messung mit unveränderlicher Normale.

In neuerer Zeit zieht man den teuren und doch schließlich leichter einer Störung oder ungewünschten zeitlichen Änderung ausgesetzten „veränderlichen Normalen“ (II, 1 in **17**) die weit billigeren unveränderlichen Normalen [1])

1) Nach sorgfältigen Untersuchungen von ROSA und GROVER (Washington 1905 Bureau of Standards, Druckschrift Nr. 15) sind übrigens die von deutschen Firmen fast allgemein für diese Normalen verwendeten Serpentinrollen nicht ganz einwand-

vielfach vor. Es fragt sich nun, ob auch mit solchen ohne endloses Probieren eine Abgleichung bei der vorhergehenden Schaltung möglich ist. Theoretisch ist die Abgleichung auf alle Fälle dadurch ausführbar, daß man in der Beziehung

$$L_x = L_a \cdot \frac{d}{c} = L_a \cdot \frac{b}{a}$$

bei feststehendem Wert von L_x und von L_a (der Normale) den dritten Faktor, d. i. das Verhältnis $\frac{d}{c} = \frac{b}{a}$ so lange abändert, bis jenes doppelte Gleichgewicht vorliegt. Praktisch führt es aber ohne Anwendung des sogleich anzugebenden Kunstgriffes nur zu einem endlosen Probieren oder einem circulus vitiosus von Gleich- und Wechselstrom-Gleichgewichtseinstellungen. Vermieden wird dies unter verhältnismäßig rascher Erreichung des Zieles nach einigen orientierenden Beobachtungen mit dem weniger empfindlich gemachten Galvanometer, wenn man folgendes Vorgehen einhält: Ist wiederum die Normale L_a — hier unveränderlich gedacht — in a eingeschaltet, die gesuchte Selbstinduktion in b, so bringt man außer einem Widerstandskasten in a oder b in die Zweige c und d (Fig. 37 b) von vornherein so viel reichlich unterteilten bifilaren Widerstand, am besten in Form zweier passender Widerstandskästen, daß man stets $c = a$ und $d = b$ machen kann und bewerkstelligt die erste orientierende Gleichgewichtseinstellung mit Gleichstrom unter Einhaltung dieser Beziehung. Will man jetzt das Verhältnis $\frac{d}{c}$ und $\frac{b}{a}$ zur Erreichung des Wechselstromgleichgewichts (bei drehendem Kommutator) beliebig in weiten oder engen Grenzen abändern, ohne gleichzeitig das Gleichstromgewicht merklich zu stören, so erreicht man dies gleichsam automatisch, d. h. ohne anstrengende Überlegung über die Wirkung der Widerstandsänderung, wenn man stets dieselben Beträge in Ω in b und d bzw. in c und a zu- oder wegstöpselt, also z. B. in Zweig d und b den Stöpsel 200 Ω zieht. Auf diese Weise kann man so rasch, wie immer bei derartig orientierenden Messungen, z. B. gewöhnlichen Widerstandsmessungen, durch Beobachten des Abfahrens des Galvanometerzeigers nach rechts oder links vom Nullpunkt zunächst die ungefähre Lage des Verhältnisses $\frac{d}{c}$ bzw. $\frac{b}{a}$ feststellen, um hieran seine genaue Feststellung bei voller Galvanometerempfindlichkeit mit Hilfe des Interpolationsverfahrens anzuschließen. Unmittelbar vor der Ermittelung des genauen Verhältnisses bei Wechselstrom wird man noch einmal eine möglichst genaue Gleichstromeinstellung vornehmen, da sehr kleine Unterschiede auch zwischen den gleichbenannten Werten verschiedener Widerstandskästen auftreten, was am einfachsten durch Einschaltung eines Stückes Gleitdraht zwischen c und d und kleiner Verschiebung des Gleitkontaktes ermöglicht wird.

Zur Veranschaulichung der Ermittelung des Endwertes aus den beiden Interpolationsmessungen sei folgendes Zahlenbeispiel angeführt:

---

frei, da sie Spuren von Eisen enthalten, die eine kleine Änderung des Wertes von L abhängig von der Stromstärke zur Folge haben; sie betrug für die von Rosa verwendeten Meßgrenzen etwa $^1/_4$ %, was bei Normalen auf Mahagoniholz nicht der Fall war.

L_a	$d = b$	$c = a$	$\frac{d}{c}$	α	β	$\left(\frac{d}{c}\right)_i$	$L_x = L_a \cdot \left(\frac{d}{c}\right)_i$
Mh	Ω	Ω					*Mh*
20·13	218·00	11·62	18.76	35·5		18·442	371·6
20·13	213·00	11·62	18·33		12·5		

Aus den Ausschlägen rechts von der Nulllage (α) und links von der Nulllage (β) bei Änderung der beiden Brückenzweige d und b um 5 Ω ergibt sich für genaue Nullstellung das interpolierte Verhältnis $\left(\frac{d}{c}\right)_i = 18{\cdot}442$ und hieraus durch Multiplikation mit der unveränderlichen Normalen von 20·13 Millihenry der gesuchte Selbstinduktionskoeffizient zu 371·6 Millihenry. Als Nullinstrument wurde ein Drehspulengalvanometer mit etwa 474 Ω und einer Stromkonstanten $C = 2{\cdot}22 \cdot 10^{-9}$ Amp. für 1 mm Ausschlag bei etwa 1·25 m Skalenentfernung benutzt, als Stromquelle 2 Akkummulatorzellen; die Zahl der sekundlichen Stromwechsel war etwa 20.

Sind L_a und L_x von sehr abweichender Größe, so tut man im Interesse der Meßempfindlichkeit gut, Galvanometer- und Batteriezuführungen gegenüber der obigen Annahme zu vertauschen, d. h. die Batteriezuleitungen bei 3 und 4 anzuschließen (Fig. 37). Allerdings darf hierbei nicht übersehen werden, daß in diesem Fall ω_i bzw. dessen Kurvenfaktor c_i in den beiden Selbstinduktionszweigen nicht n o t w e n d i g genau übereinstimmen muß und hieraus kleine Fehler entstehen k ö n n e n, wenn sie praktisch wohl auch nur selten merkliche Größe erlangen werden.

Für sehr kleine Werte von L_x (unterhalb von 1 Mh) wird diese Schaltung notwendig, gleichzeitig wird aber auch eine Messung mit ausreichender Zuverlässigkeit überhaupt immer schwieriger, so daß man alsdann andere Verfahren, vor allem die Verwendung h ö h e r e r Werte von ω (siehe unten) vorziehen wird, um das Zusatzglied in $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ noch ausreichend groß gegenüber dem Ohmschen Widerstand R zu erhalten.

21. Telephonbrücke für Selbstinduktionsmessungen.

Eine solche Meßanordnung, welche mit verhältnismäßig hohen Wechselzahlen ($z = 1000$ bis 2000, also ω von etwa 3000 bis 6000) leichte Transportierbarkeit und Aufstellung sowie ziemlich rasche Durchführung der Messung gestattet, stellt die Telephonbrücke dar.

Die neueren Ausführungen mit Mikrophonsummer (siehe **11**) als Stromquelle und der Wechselstrombrücke von S. & H. zur Ermittelung des Gleich- und Wechselstromgleichgewichtes sind in erster Linie für die Messung der Wechselstromkoeffizienten von Apparaten der Schwachstromtechnik gedacht und haben auch die Ausgestaltung eines Apparates zur Bestimmung sehr kleiner Selbstinduktionen ermöglicht.

Unter Benutzung des schon oben (**18**) abgeleiteten allgemeinen Brückenprinzips zur Vergleichung von Selbstinduktionskoeffizienten hat die Wechselstrombrücke (vgl. Z. f. J. 1903 Heft 8) von S. & H. anschließend an die Form des sog. Universalgalvanometers (II, 1 in **154**) die handliche Ausführung der Fig. 38 erhalten. Die Bedeutung der Buchstaben und die inneren Verbindungen werden durch das Schema der Fig. 39 kenntlich, welche auch unschwer den Anschluß an die vorausgehend behandelten Brückenschemata erkennen läßt. Denkt man sich an B die Batterie für die Gleichstrommessung, an S den Mikrophonsummer als Wechselstromquelle angeschlossen, sowie an T ein Telephon als Wechselstromempfänger bzw. Nullinstrument

der mit Wechselstrom beschickten Brücke, so läßt das Schema der Fig. 39 erkennen, daß durch Stecken des Doppelstöpsels bei *G* (Gleichstrom) die Batterie *B* angeschaltet, das Telephon *T* hingegen selbsttätig abgeschaltet wird, während das als Gleichstromnullinstrument benutzte Drehspuleninstrument angeschaltet bleibt. Umgekehrt wird beim Umstecken des Stöpsels nach *W* (Wechselstrom, wie in Fig. 39 gezeichnet) der Summer *S* und das



Fig. 38.

Telephon *T* angeschlossen, das Galvanometer selbsttätig abgeschaltet. Der im Kreis angeordnete Widerstandssatz R_h von 0·1 bis 20 Ω kann einmal durch Umstecken des Stöpsels je nach Bedarf auf die Seite von *N* oder *X* geschaltet, sowie durch Einschaltung weiterer Widerstandskästen bei ∞ beliebig erweitert werden.

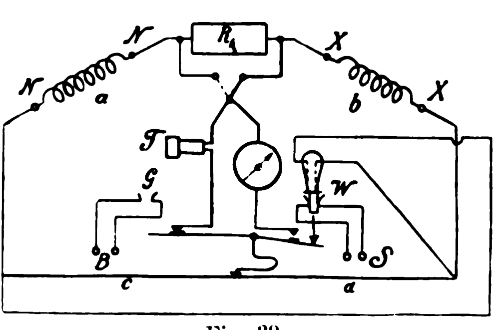


Fig. 39.

Der Verlauf der Messung ist hier folgender: Zuerst wird durch Stecken des Stöpsels bei *W* mit Hilfe des Telephons das Wechselstromgleichgewicht aufgesucht und zwar bei unveränderlicher Induktionsnormale, an deren Benutzung hier in erster Linie gedacht ist, in zwei Stufen, also mit anfänglicher Einstellung auf relatives Tonminimum und hieran anschließend das Auf-

suchen eines absoluten, d. h. möglichst scharfen Minimum (Verschwinden des Tones). Die Verhältnisse liegen hier ganz ähnlich, wie früher in **12** angegeben, nur daß hier L anstelle von C tritt und die doppelte Krümmung der in Fig. 27 angedeuteten Fläche bedingt. Da das Telephon in allen Fällen die Aufsuchung des Wechselstromgleichgewichtes veranlaßt, d. h. der Gleichung genügt

$$Z_a : Z_b = Z_c : Z_d = R_c : R_d,$$

so wird die Zusammensetzung von $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ praktisch folgende 3 Fälle unterscheiden lassen:

1. Z wird hauptsächlich durch $(\omega \cdot L)$ bedingt. Alsdann gibt das erste Überfahren des Gleitdrahtes $(c + d)$ und Einstellen auf Tonminimum sogleich angenähert die Beziehung

$$L_a : L_b = c : d \text{ oder } L_x = L_n \cdot \frac{d}{c}.$$

Eine Änderung der Werte R_a bzw. R_b durch Stöpseln des Hilfswiderstandes R_h wird das Tonminimum nur wenig beeinflussen und die endgültige Einstellung auf „scharfes" Minimum mit der Variation von R_h und kleiner Verschiebungen am Gleitklotz wird nur wenig verschieden sein von dem anfänglich gefundenen Verhältnis $\frac{d}{c}$. Da „scharfes" Minimum, d. i. die tiefste Stelle der doppelt gekrümmten Fläche (Fig. 27 in **12**) nur dann erreicht wird, wenn

$$\text{sowohl } Z_a : Z_b \text{ d. h. } \sqrt{R_a{}^2 + (\omega L_a)^2} : \sqrt{R_b{}^2 + (\omega L_b)^2} = c : d$$
$$\text{als auch } R_a : R_b = c : d,$$

so wird in diesem Fall die Abgleichung mit R_h, d. h. die Erreichung der Gleichung $R_a : R_b = c : d$ den schwierigsten Teil der Aufgabe bilden und bei der Unvollkommenheit des Gehörs als Beobachtungsorgan auch die verhältnismäßig größte Unsicherheit besitzen.

2. Z wird hauptsächlich durch das erste Glied R bedingt, oder $(\omega \cdot L)$ bzw. L ist klein gegenüber R. In diesem Fall findet eine Umkehrung der Verhältnisse gegenüber 1 statt. Die erste Einstellung hängt in erster Linie von $R_a : R_b$ ab und ist für die endgültige Einstellung, welche gleichzeitig die Bedingung

$$L_a : L_b = c : d$$

befriedigt, wenig maßgebend. Hieraus folgt weiterhin die größere Mühsamkeit der Erzielung dieser Endeinstellung durch vielfältiges Probieren und Verändern von R_h und $c : d$; ferner folgt eine zwar größere Zuverlässigkeit in der Einstellung von $R_a : R_b = c : d$, aber eine geringere Zuverlässigkeit in der Ermittelung des gesuchten Koeffizienten L_x. In diesen naturgemäß schwierigen Fällen, d. h. bei großer Kleinheit von L gegenüber R, würde nur eine Verbesserung durch weitere Erhöhung von ω, etwa unter Benutzung des Wellenstromlichtbogens zu erzielen sein, oder aber durch eine Abänderung der Meßanordnung dahin, daß nicht eine feste, sondern eine variable Normale L_n benutzt wird, etwa wie bei der unten (**22**, Fig. 42) beschriebenen Anordnung.

3. Z wird in seiner Größe von dem ersten Glied R und dem zweiten Glied ωL etwa gleichwertig beeinflußt. Dieser mittlere Fall zwischen 1 und

2 wird alle Übergänge zeigen und sich dementsprechend mehr an 1 oder an 2 annähern.

Ehe auf die Bestimmung des sogenannten Verlustwiderstandes eingegangen sei, welche durch die anschließende Gleichstromeinstellung aus dem Unterschied zwischen Gleichstromgleichgewicht und Wechselstromgleichgewicht ermöglicht wird, mögen die Ausführungen der Wechselstrombrücke unter Anpassung an bestimmte Verhältnisse sogleich Erwähnung finden.

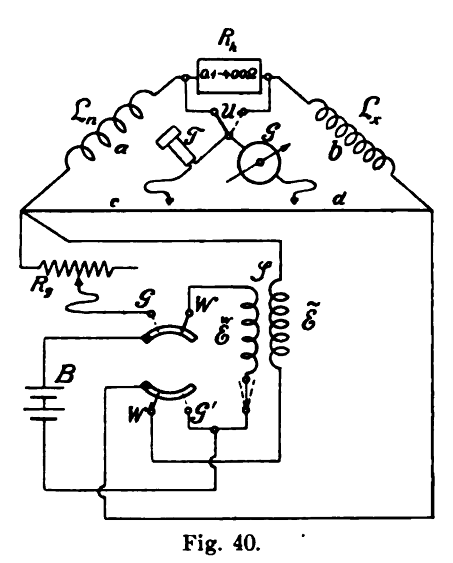


Fig. 40.

22. Wechselstrombrücken für Laboratoriumszwecke. Zunächst sei darauf hingewiesen, daß die Zusammenstellung einer Wechselstrombrücke aus einzelnen Laboratoriumsapparaten leicht zu bewerkstelligen ist, indem man etwa nach dem Schema der Fig. 40 einen Gleitdraht cd mit der unveränderlichen oder auch veränderlichen Normale L_n, der zu messenden Wickelung L_x und einem passenden Widerstandskasten R_h, der genügend frei von Selbstinduktion und Kapazität ausgeführt ist, zu einem Leiterkreis vereinigt und durch einen einpoligen Umschalter U ermöglicht R_h rasch auf Seite a oder b schalten zu können. Telephon T und Galvanometer G als Nullinstrumente werden am besten an 2 verschiedene Gleitklötze angeschlossen und je nach Bedarf eingeschaltet. Ferner kann man bei Benutzung eines doppelpoligen Umschalters, etwa eines Voltmeterumschalters, wie in Fig. 40 angegeben, dieselbe Batterie (2 Akkumulatoren) für den Betrieb der Wechselstromquelle (Induktorium, Summer) bei Schaltung auf WW' und für die Gleichstromschaltung, bei Schaltung auf GG' benutzen, gegebenfalls unter Einschaltung eines Regulierwiderstandes R_g zur Verkleinerung der Gleichstromstärke. Macht man T noch abschaltbar, so kann man zur Bestimmung des Verlustwiderstandes (R_δ siehe in **23**) auch den Gleitklotz von T sogleich stehen lassen und erhält den Übergang von $\frac{d}{c}$ in $\frac{d'}{c'}$ durch die Differenzstrecke $d-d'$ zwischen beiden Gleitklötzen augenfällig dargestellt. Vertauschung von T und $\overline{E}$ bzw. G und $\overline{E}$ wird sich auch hier zur Steigerung der Empfindlichkeit zuweilen empfehlen und ist ohne Schwierigkeit ausführbar, was bei der festen Brücke nicht der Fall ist.

Sind die oben unter 2 aufgeführten Fälle für die Messung schon an sich sehr ungünstig, so steigt die Schwierigkeit immer mehr und führt trotz der größten Mühsamkeit nicht mehr zu befriedigenden Ergebnissen, wenn die zu messende Selbstinduktion sehr kleine absolute Werte (etwa unter 1 Millihenry) besitzt, namentlich bei unveränderlichen Normalen L_n von erheblich höheren Beträgen.

Für diese Fälle wird von der Firma S. & H. ein besonderer Apparat gebaut, den Fig. 41 in der Ansicht, Fig. 42 im Schaltungsschema zeigt. Der Gleitdraht cd ist zur Vermeidung der Fehler durch gegenseitige Induktion hier gerade gestreckt und nur 100 mm lang. Zur Erhöhung der Empfindlichkeit wird die Wechselstromquelle, z. B. Summer, nicht unmittelbar angelegt,

sondern auf höhere Stromstärken transformiert in einem besonderen in den Figuren nicht angegebenen Transformator.

Die Schwierigkeit, welche bei der Aufsuchung des Minimums in zwei Stufen aus den oben (21) unter 2 angegebenen Gründen eintritt, wird hier dadurch im wesentlichen vermindert, daß man für L_n eine variable Selbstinduktion benutzt. Diese besteht aus wenigen (8) Windungen und einem gut unterteilten Eisenkern K, dessen Einstellung an einer Skalenteilung den zugehörigen Wert von L_n abzulesen gestattet. Die erste Einstellung des Telephons T durch Verschieben des Schlittens zwischen c und d wird ein

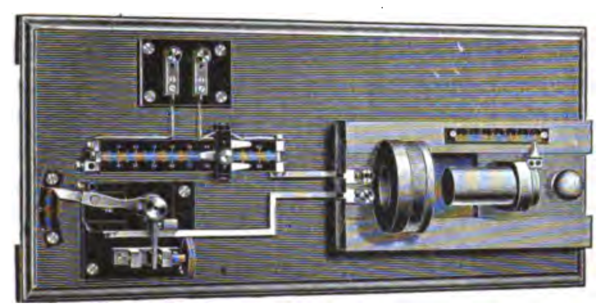


Fig. 41.

unscharfes Minimum liefern, das im wesentlichen von dem Verhältnis der Ohmschen Widerstände bedingt wird. Das Minimum wird nun dadurch „scharf" gemacht, daß man Selbstinduktionsminimum mit Widerstandsminimum zur Deckung bringt, indem man den Eisenkern K verschiebt und weitere Korrekturen noch durch Verschieben des Gleitkontaktes auf dem 2 cm langen Manganindraht W bewirkt, sowie, falls nötig, mit einem Stöpselwiderstand R von 0·1 bis 0·5 Ω. Zu beachten bleibt, daß die von der beigegebenen Eichkurve für L_n entnommenen Werte eigentlich nur für die normalen, auch bei der Eichung eingehaltenen Betriebsverhältnisse gelten, sowohl was ω und namentlich was $\tilde{J}$ anlangt, wenn auch auf der anderen Seite nicht zu übersehen ist,

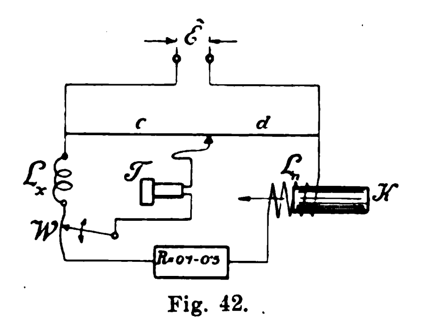


Fig. 42.

daß die geringe Länge des Kernes K der Permeabilitätskurve μ_g in der Beziehung $L_n = L_1 \cdot \mu_g$ (vgl. 14) einen flachen Charakter verleiht, so daß die Fehler bei abweichendem $\tilde{J}$ kleiner als gewöhnlich sind.

Bei geeigneten Betriebsverhältnissen soll dieser Apparat Werte von L_x bis herunter zu 10^{-7} Henry oder 10^2 cm mit einer Zuverlässigkeit von 1 bis 2 % bestimmen lassen.

28. Ermittelung des Verlustwiderstandes. Die Widerstandserhöhung durch Wirbelströme in massiven Kupferdrähten, sowie namentlich die Leistungen im Felde bei Eisenkernen, Kurzschlußbahnen oder belasteten Sekundärkreisen bewirkt, wie schon oben (14) näher ausgeführt, daß bei Wechselstrom, besonders bei höheren ω-Werten, die wirksamen Werte R_w und L_w zur Messung gelangen. Bezeichnet man diese im Folgenden durch $\tilde{R}$ bzw. $\tilde{L}$, so werden sie von den Gleichstromwerten $\overline{R}$ bzw. den ideellen Werten L erheblich, ja bis zum Mehrfachen abweichen können.

In allen diesen Fällen wird der Wechselstromwiderstand durch

$$\frac{\tilde{E}}{\tilde{J}} = Z = \sqrt{\tilde{R}^2 + (\omega\,\tilde{L})^2}$$

dargestellt, indem man nach den Ausführungen bei Fig. 35 zerlegt:

$$\tilde{E} = \sqrt{\tilde{E}_r^2 + \tilde{E}_L^2} = \sqrt{(\tilde{J}\cdot\tilde{R})^2 + (\tilde{J}\cdot\omega_i\cdot\tilde{L})^2} = J\sqrt{\tilde{R}^2 + (\omega_i\cdot\tilde{L})^2}.$$

Von den so erhaltenen wirksamen oder Leistungswerten ist $\tilde{L}$ kleiner als der reine Koeffizient L_{μ}, wie die Ableitung in **16** ergab; hingegen ist der auf die Wickelung reduziert gedachte Leistungswiderstand $\tilde{R} = \frac{\tilde{E}_r}{\tilde{J}} = \frac{W}{\tilde{J}^2}$ (vgl. hierzu I, 2 in **142**) größer als $\overline{R}$. Ohne belastete Sekundärkreise, z. B. beim leerlaufenden Transformator oder bei irgend einer anderen eisenhaltigen Wickelung, wird diese Vergrößerung sich zwar in mäßigen Grenzen halten, aber immerhin merklich sein. Hat man nun, wie im Vorausgegangenen angegeben, auf „scharfes" Minimum in zwei Stufen eingestellt, so liefert das so gewonnene Wechselstromgleichgewicht neben der Beziehung

$$Z_a : Z_b = c : d \quad \text{bzw.} \quad Z_x = Z_n \cdot \frac{d}{c} \quad \text{auch}$$

$$\tilde{L}_a : \tilde{L}_b = c : d \quad „ \quad \tilde{L}_x = \tilde{L}_n \cdot \frac{d}{c} \quad \text{und}$$

$$\tilde{R}_a : \tilde{R}_b = c : d \quad „ \quad \tilde{R}_x = \tilde{R}_n \cdot \frac{d}{c}.$$

Wird nun die benutzte Normale aus einer eisenfreien Spule mit sehr gut unterteiltem Leitungsquerschnitt (Litze) gebildet, so wird sehr nahe $\tilde{L}_n = L_n$ und $\tilde{R}_n = \overline{R}_n$. Bei den wirksamen Werten $\tilde{L}_x$ und $\tilde{R}_x$ der zu messenden Wickelung wird dies aber im allgemeinen nicht der Fall sein, sondern neben einer Verkleinerung von $\tilde{L}_x$ wird eine Vergrößerung des auf die Wickelung reduziert gedachten Wechselstromwertes $\tilde{R}_x$ gegenüber dem Gleichstromwert $\overline{R}_x$ eintreten. Diese vielfach als Verlustwiderstand $\tilde{R}_\delta = \tilde{R} - \overline{R}$ bezeichnete Differenz wird man also erhalten können, wenn man nach Einstellung der Wechselstrombrücke auf „scharfes" Minimum noch eine Messung mit Gleichstrom anschließt und den Gleichstromwert $\overline{R}_x$ entweder durch Veränderung des Verhältnisses $\frac{d}{c}$ in $\frac{d'}{c'}$ zu

$$\overline{R}_x = \overline{R}_n \cdot \frac{d'}{c'} \quad \text{also} \quad \tilde{R}_\delta = \tilde{R}_x - \overline{R}_x = \overline{R}_n\left(\frac{d}{c} - \frac{d'}{c'}\right)\,\Omega_w$$

bestimmt, oder — für die Gleichgewichtseinstellung und die Rechnung meist unbequemer — bei unverändertem Verhältnis $\frac{d}{c}$ das Gleichstromgleichgewicht durch Variation von R_h (vgl. Fig. 39) bewerkstelligt und bei einer erforderlichen Änderung von R_h um $\delta\,\Omega$ die Beziehung erhält:

$$\overline{R}_x = (\overline{R}_n - \delta)\cdot\frac{d}{c} \quad \text{oder} \quad \tilde{R}_\delta = \tilde{R}_x - \overline{R}_x = \delta\cdot\frac{d}{c}\,\Omega_w.$$

Muß hierbei, wie dies ziemlich häufig der Fall ist, R_h von R_n nach R_x umgeschaltet werden, so wird der bei R_n weggeschaltete Betrag δ' mit $\frac{d}{c}$

multipliziert, während der zu R_x hinzugeschaltete Betrag δ'' einfach hinzugerechnet wird, so daß also in diesem Fall

$$\tilde{R}_\delta = (\delta' \cdot \frac{d}{c} + \delta'')\ \Omega_w.$$

Graphisch ist der Unterschied zwischen $\tilde{R}_w$ und $\overline{R}$ in Fig. 35 durch die Längen von $\tilde{E}_r = \tilde{J} \cdot \tilde{R}$ und $\tilde{E}_R = \tilde{J} \cdot \overline{R}_I$ dargestellt, gleichsam als der allgemeine Fall, der im Grenzfall in die Verhältnisse der Fig. 31 übergeht, wo $\tilde{R} = \overline{R}$, also keinerlei Leistung durch das Feld übertragen oder in ihm verbraucht wird.

Es muß aber nochmals (**21**) darauf hingewiesen werden, daß die Bestimmung von $\tilde{R}_\delta$ nicht nur in allen den Fällen geringere Zuverlässigkeit besitzt, wo (ωL) stark überwiegt, weil sich das Tonminimum mit kleineren Änderungen von R_h zu wenig ändert, um hinreichend scharf erkannt zu werden, sondern daß das ermittelte $\tilde{R}_\delta$ auch immer nur einen relativen Wert besitzt (**13**), weil es einmal von ω abhängig ist und sich mit diesem ändert und weil in vielen Fällen nicht ausreichend $\tilde{R}_n = \overline{R}_n$ gesetzt werden kann, so daß eigentlich

$$\tilde{R}_\delta = \tilde{R}_n \left(\frac{d}{c} - \frac{d'}{c'}\right) \Omega_w.$$

Folgendes Zahlenbeispiel möge die Auswertung der Beobachtungen an der Telephonbrücke erläutern:

Als Normale wurde eine eisenfreie Spule aus starkem Draht benutzt mit $L_n = 3{\cdot}37$ Mh und $\overline{R}_n = 0{\cdot}540\ \Omega$ (vgl. hierzu Fig. 43 bzw. 40). Untersucht wurde eine Spule mit geringerer Windungszahl zuerst mit, dann ohne Eisenkern. Mit Eisenkern ergab das Tonminimum bei Wechselstrom:

$$Z_x : Z_n = c : d = 37{\cdot}6 : 62{\cdot}4;\ \text{also}\ L_x = L_n \cdot 0{\cdot}603 = 3{\cdot}37 \cdot 0{\cdot}603 = 2{\cdot}03\ \text{Mh}.$$

Da das Minimum am schwächsten wurde, wenn R_h mit etwa $1{\cdot}4\ \Omega$ zu L_n geschaltet wurde, so folgt

$$\tilde{R}_x = \tilde{R}_n \cdot 0{\cdot}603 = 1{\cdot}94 \cdot 0{\cdot}603 = 1{\cdot}17\ \Omega_w,\ \text{wenn man}\ \tilde{R}_n = \overline{R}_n\ \text{setzt.}$$

Wurde das Telephon durch ein Galvanometer und $\tilde{J}$ durch J ersetzt, so fand sich beim Verschieben des Gleitklotzes, bis Gleichstromgleichgewicht erzielt war:

$$\overline{R}_x : (\overline{R}_n + R_h) = c' : d' = 10{\cdot}8 : 89{\cdot}2\ \text{also}\ \overline{R}_x = 1{\cdot}94 \cdot 0{\cdot}132 = 0{\cdot}257\ \Omega$$

so daß $\tilde{R}_\delta = \tilde{R}_x - \overline{R}_x = 1{\cdot}94\,(0{\cdot}603 - 0{\cdot}132) = 0{\cdot}915\ \Omega_w$ folgen würde.

Wurde das Gleitklotz nicht verschoben, sondern R_h variiert, so mußte der ganze Betrag von R_h mit $1{\cdot}4\ \Omega$ weggeschaltet werden, ohne daß völliges Gleichgewicht erzielt wurde. Erst bei Umschaltung von R_h zu R_x wäre dies bei Einschaltung von etwa $0{\cdot}07\ \Omega$ gelungen, wie die Interpolation mit $0{\cdot}1\ \Omega$ ergab. Dies gibt wiederum als Resultat

$$\tilde{R}_\delta = \delta' \cdot \frac{c}{a} + \delta'' = 1{\cdot}4 \cdot 0{\cdot}603 + 0{\cdot}07 = 0{\cdot}915\ \Omega_w.$$

Ohne Eisenkern ergab sich Wechselstromgleichgewicht bei $c = 18{\cdot}0$ cm. Hieraus folgt

$$L_x : L_n = 18 : 82 = 3{\cdot}37 \cdot 0{\cdot}22 = 0{\cdot}742\ \text{Mh}.$$

Hier wurde das Minimum am schwächsten, wenn ein kleiner Betrag, etwa $0{\cdot}1\ \Omega$, zu L_x geschaltet wurde. Bei Gleichstrom fand sich

$$(\overline{R}_x + 0{\cdot}1) : R_n = 38{\cdot}6 : 61{\cdot}4\ \text{also}\ \overline{R}_x = 0{\cdot}24\ \Omega.$$

Hieraus folgt, daß diesmal

$$\tilde{R}_n = (\tilde{R}_x + 0{\cdot}1) \cdot 4{\cdot}55 = 1{\cdot}51\ \Omega_w,$$

also die erheblichen Wirbelstromverluste in den dicken Wickelungen der als L_n benutzten Spule — gearbeitet wurde mit ungefähr 10000 sekundlichen Wechseln — dessen wirksamen Wert um $\tilde{R}_\vartheta = 0{\cdot}97\ \Omega_w$ erhöht. Führt man dies Ergebnis als Korrektur beim vorausgehenden Fall ein, so ergibt sich für die Spule mit Eisenkern der Verlustwiderstand etwa zu

$$R_\vartheta = \tilde{R}_n \cdot 0{\cdot}603 = 2{\cdot}91 \cdot 0{\cdot}603 = 1{\cdot}75\ \Omega_w.$$

Als Erklärung für die angegebene hohe Wechselzahl sei erwähnt, daß für die Messung der Wechselstrom eines Schwingungskreises am Wellenstromlichtbogen benutzt wurde. Die anfängliche Benutzung eines Mikrophonsummers lieferte zwar in der obigen Meßanordnung bei höheren Selbstinduktionswerten noch allenfalls brauchbare Beobachtungen, versagte aber bei den kleineren Werten wie den obigen. Die Abzweigungen von der Selbstinduktionsspule (L_1 in Fig. 43) eines Wellenstromlichtbogen - Schwingungskreises lieferte mit der in Fig. 43 angedeuteten Schaltung aber befriedigende Resultate, namentlich für die Selbstinduktionskoeffizienten. Die Wahl des sekundlichen z bzw. ω hat man durch Änderung von L und C innerhalb weiter Grenzen sehr bequem in der Hand, ebenso wie auch die Bestimmung von ω mit ausreichender Zuverlässigkeit sehr einfach durch Messung von $\tilde{J}_1$ und $\tilde{E}_1$ zu $\omega = \dfrac{\tilde{E}_1}{\tilde{J}_1 \cdot L_1}$ erfolgen kann.

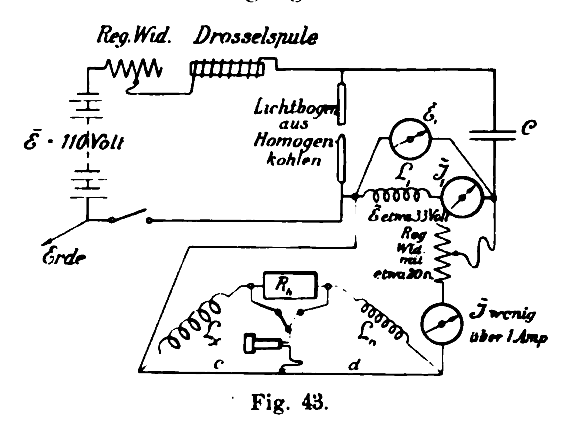
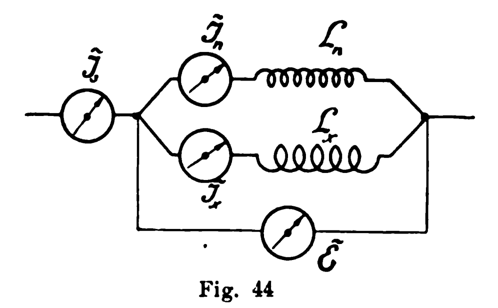


Fig. 43.



Wünscht man überhaupt von der Benutzung des Telephons abzusehen, entweder weil das Ohr als Beobachtungsorgan in vieler Hinsicht dem Auge zu sehr nachsteht, oder weil man — damit in Zusammenhang — die größere Nervenanspannung, welche ein solches unvollkommeneres Beobachtungsorgan bei Anstrebung größerer Genauigkeit zur Folge hat, vermeiden will, oder endlich weil ein ungestörter Beobachtungsplatz, der ausreichend gegen den Ton der Primärquelle oder auch sonstige Geräusche geschützt ist, praktisch nicht zur Verfügung steht, so läßt die Benutzung des Wellenstromlichtbogens noch eine andere Art der Vergleichung von Selbstinduktionskoeffizienten zu, die sowohl wegen ihrer Bequemlichkeit als auch wegen ihrer Eignung zur Messung sehr kleiner Koeffizienten Beachtung verdient: Wird die, wie in Fig. 43 angegeben, von L_1 abgezweigte Wechselspannung $\tilde{E}$ zu einer Ver-


Fig. 44

zweigung geführt,[1]) bestehend aus L_n mit Amperemeter $\tilde{J}_n$ einerseits (Fig. 44), aus L_x mit Amperemeter $\tilde{J}_x$ andererseits, so ergibt sich die außerordentlich einfache Beziehung für die Wechselstromwiderstände $Z_x = Z_n \cdot \frac{\tilde{J}_n}{\tilde{J}_x}$, woraus praktisch fast ausnahmslos bei hinreichend hohem Wert von ω als hinreichend genau $\tilde{L}_x = \tilde{L}_n \cdot \frac{\tilde{J}_n}{\tilde{J}_x}$ folgt. Will man nachprüfen, ob diese Vereinfachung zulässig ist, bzw. die Anbringung einer entsprechenden Korrektion vornehmen, oder einfacher durch Erhöhung von ω vermeiden, sowie gleichzeitig die Größe von ω bestimmen, so hat man nur nötig, die für beide Zweige gemeinschaftliche Spannung $\tilde{E}$ zwischen den Enden der Verzweigung zu messen. Man erhält so einmal $\omega = \frac{\tilde{E}}{J_n \cdot L_n}$, sowie ein zweites Mal die Größe von $(\omega \cdot L_n)$ bzw. $(\omega \cdot L_x)$ gegenüber den Widerständen R_n bzw. R_x.

Als Zahlenbeispiel sei die Vergleichung der beiden oben erwähnten Drahtspulen angeführt mit gleichzeitiger Messung der Summenstromstärke $\tilde{J}_t$ vor der Verzweigung:

$\tilde{J}_n$ Amp.	$\tilde{J}_x$ Amp.	$\tilde{J}_t$ Amp.	$\tilde{E}$ Volt	$\tilde{L}_x = \tilde{L}_n \cdot \frac{\tilde{J}_n}{\tilde{J}_x}$	$\omega = \frac{\tilde{E}}{\tilde{J}_n \cdot L_n}$	Bemerkung
0·62	2·8	3·4	44	0·746 Mh	21 200	ohne Eisenkern in L_x bei $L_n = 3{\cdot}37$ Mh
1·15	1·65	2·90	56	2·35 Mh	14 400	mit Eisenkern in L_x

Im ersten Fall liefert $(\omega \cdot L_n) = 21\,200 \cdot 3{\cdot}37 \cdot 10^{-3} = 71\, \Omega_t$. Demgegenüber steht $\overline{R}_n$ von Spule und Hitzdrahtamperemeter mit etwa 0·7 Ω. Selbst wenn $\tilde{R}_n$ auf den zehnfachen Betrag anwachsen würde, was aber im vorliegenden Fall keineswegs der Fall ist (vgl. oben (**23**), wo ω noch erheblich höher war), so würde doch $Z_n = \sqrt{(\omega\, L_n)^2 + \tilde{R}_n^2}$ um noch nicht mehr als $\frac{1}{2}\,\%$ vergrößert werden, wobei ganz davon abgesehen ist, daß auch im anderen Zweig eine etwa entsprechende Vergrößerung zu erwarten ist, die den kleinen Fehler noch größtenteils wieder in Fortfall bringt. Dasselbe gilt im allgemeinen auch bei Spulen mit unterteiltem Eisenkern, da $\tilde{L}$ gewöhnlich stärker zunimmt als $\tilde{R}$. Daß bei der Spule mit Eisenkern $\tilde{L}_x$ etwas größer gefunden wurde als mit der Telephonbrücke in **23**, erklärt sich aus der abweichenden Stromstärke und Wechselzahl.

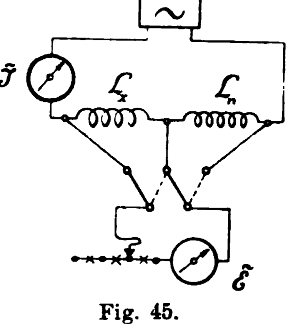


Fig. 45.

Noch einfacher gestaltet sich die Vergleichung zweier Selbstinduktionskoeffizienten bei Reihenschaltung von L_n und L_x, da man in diesem Fall mit einem Voltmeter und einem Amperemeter auskommt,

1) In vielen Fällen wird man noch bequemer die Verzweigung an die Stelle des obigen L_1 treten lassen, wie dies im folgenden Zahlenbeispiel geschah.

wie die Schaltung der Fig. 45 zeigt. Für die Werkstattmethode benutzt man am einfachsten Hitzdrahtinstrumente zur Messung von $\tilde{J}$ und $\tilde{E}$, während man im Laboratorium $\tilde{E}$ vielfach besser durch ein Elektrometer bzw. Multicellularvoltmeter messen wird. Man bedient sich mit Vorteil eines Fünfschalters (Fig. 45), um mit demselben Voltmeter — falls nötig unter Benutzung verschiedener Vorschaltwiderstände, etwa mit dem Voltmeter zusammengeeichte Glühlampen (vgl. Fig. 5) — die Spannungen E_x und E_n bei demselben Stromstärkewert $\tilde{J}$ zu beobachten. Man erhält alsdann praktisch wohl stets ausreichend, d. h. unter denselben Bedingungen über das Verhältnis von ωL zu $\tilde{R}$ wie oben, die einfache Beziehung

$$\tilde{L}_x : \tilde{L}_n = \tilde{E}_x : \tilde{E}_n \text{ also } \tilde{L}_x = \tilde{L}_n \cdot \frac{\tilde{E}_x}{\tilde{E}_n}.$$

Um unbequeme Korrektionen zu vermeiden, hat man nur darauf zu achten, daß der Stromverbrauch des Voltmeters, auch bei Hitzdrahtinstrumenten, hinreichend klein ist gegenüber $\tilde{J}$. Dies ist aber bei der Größe von $\omega \tilde{L}$ gegenüber $\tilde{R}$, d. h. der nahe 90^0 betragenden Phasenverschiebung zwischen dem Voltmeterstrom $\tilde{J}_V$ und $\tilde{J}_x$ bzw. $\tilde{J}_n$ ausreichend erfüllt, wenn $\tilde{J}_V$ nicht mehr als etwa 10% von $\tilde{J}$ beträgt, was von vornherein meist der Fall ist, oder

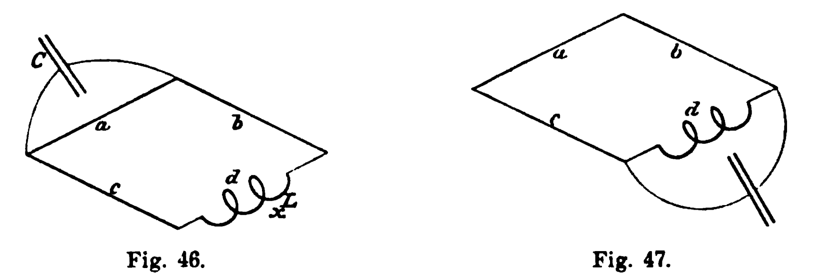


Fig. 46. Fig. 47.

durch Wahl von C (vgl. Fig. 43) erreicht werden kann. Die Voraussetzung, daß die zu untersuchenden Spulen diese Stromstärke — gewöhnlich 1 bis 2 Ampere — vertragen, wird bei den für diese Reihenschaltungsmethode in erster Linie in Frage stehenden kleineren Werten von L_x — etwa zwischen 0·01 und 5 bis 10 Millihenry — gewöhnlich zutreffen.

Bei der Einfachheit der Beschaffung eines solchen Wechselstromes mit sehr hoher Wechselzahl — es genügt hierzu eine geeignete Gleichstrombogenlampe für kleinere Stromstärken die beiderseits mit Homogenkohlen versehen und mit etwa 1 bis 2 Ampere betrieben wird, sowie ein Papierkondensator von etwa 1 Mikrofarad — bilden die beiden letzten Methoden, die gleichsam Werkstattmethoden gegenüber den Brückenmethoden darstellen, eine wertvolle Ergänzung der bisherigen Methoden zur Bestimmung von Wechselstromkoeffizienten.

25. Vergleichung von Induktionskoeffizienten und Kapazitäten. Neben der Vergleichung zweier Selbstinduktionskoeffizienten besteht auch noch die Möglichkeit der Messung eines einzelnen Koeffizienten L durch Zurückführung auf eine Kapazitätsnormale C, als dem zu L reziproken Wechselinduktionskoeffizienten. Zwar besteht auch bei Brückenmethoden die Möglichkeit den Wert von L auf den dritten Leitungskoeffizienten, nämlich den Gleichstromkoeffizienten R zurückzuführen, doch haben diese absoluten Methoden, soweit die sekundliche Polargeschwindigkeit ω in die Formel eingeht, an praktischer Bedeutung durch die Einführung zuverlässiger Selbstinduktionsnormalen in

die Meßtechnik immer mehr verloren, da sie trotz größerer Umständlichkeit und Schwierigkeit in der Durchführung, doch weit weniger zuverlässig in ihrem Ergebnis sind, wozu neben der Unsicherheit in der Bestimmung des ω-Wertes auch die Nebenkoeffizienten der Bifilarwiderstände beitragen. Es möge daher genügen etwaige Interessenten auf eine solche von M. Wien angegebene Methode mit der Wechselstrombrücke (1891 Wied. Ann. 44, 701 und 58, 554) zu verweisen.

Der Wert der benutzten Polargeschwindigkeit — wenigstens soweit $\omega_e = \omega_i$ gesetzt werden kann — fällt jedoch bei folgenden Kompensationsverfahren der Wechselstromkoeffizienten heraus: Die Erhöhung des Wechselstromwiderstandes $Z = \sqrt{R + \omega_i L_x}$, welche ein unbekanntes L_x bewirkt, wird durch eine Erniedrigung desselben, oder (bei der Brücke) auch des konjugierten Wechselstromwiderstandes $Z = \frac{R}{\sqrt{1 + \omega_e \cdot C \cdot R}}$ mit Hilfe einer parallelgeschalteten Kondensatornormale von bekannter Kapazität C kompensiert. Betrachten wir zunächst die ältere der beiden Schaltungen, welche die Kompensation durch Parallelschaltung der Kapazität zum konjugierten Zweig (a) bewirkt, wenn d die unbekannte Selbstinduktion L_x enthält (Fig. 46); sie wurde zusammen mit den übrigen grundlegenden Schaltungen der Wechselstrombrücke zuerst von Maxwell (Treatise II Art. 778) angegeben.

Die für die Messung notwendige Beziehung zwischen L_x und C ergibt sich wiederum am einfachsten, wenn man unter Einführung der Wechselstromwiderstände die zwei nebeneinander bestehenden Gleichungen für das Gleichstromgleichgewicht einerseits, nämlich

$$a : b = c : d$$

und für das Wechselstromgleichgewicht andererseits (vgl. in **17**) nämlich

$$Z_a : Z_b = Z_c : Z_d \quad \text{oder} \quad Z_a \cdot Z_d = Z_b \cdot Z_c$$

aufstellt. Die letztere nimmt nach dem Vorstehenden die Formulierung an:

$$\frac{a}{\sqrt{1 + (\omega_e \cdot C \cdot a)^2}} \cdot \sqrt{d^2 + (\omega_i \cdot L_x)^2} = b \cdot c.$$

Hieraus folgt

$$a^2 d^2 + a^2 \omega_i^2 L_x^2 = b^2 \cdot c^2 + b^2 c^2 \omega_e^2 C^2 a^2, \text{ oder, da } a \cdot d = b \cdot c$$

$$a^2 \cdot \omega_i^2 \cdot L_x^2 = b^2 \cdot c^2 \cdot \omega_e^2 \cdot C^2 \cdot a^2$$

$$L_x = C \cdot b \cdot c \cdot \left(\frac{\omega_e}{\omega_i}\right).$$

Gewöhnlich wird die vereinfachte Beziehung $L_x = C \cdot b \cdot c$ angegeben und stillschweigend vorausgesetzt, daß $\omega_e = \omega_i$, doch ist sicher nur die Wechselzahl z in beiden Zweigen gleich, während das übrigbleibende Verhältnis der Kurvenfaktoren ($c_e : c_i$) für Sinuswellen zwar auch zu 1 wird, in Wirklichkeit aber hiervon merklich abweichen kann und bei eisenhaltiger Selbstinduktion in d auch abweichen wird. Die Messung erfolgt in ganz ähnlicher Weise, wie früher (**17** ff.) angegeben, sowohl was die orientierenden Messungen als was die genaue Abgleichung bzw. Interpolation anlangt. Ist der Normalkondensator in hinreichend kleinen Grenzen veränderlich, so wird für die endgültige Interpolation am besten die kleinste Kondensatorstufe benutzt; ist dies nicht der Fall, so werden passende Widerstandsänderungen zum Interpolieren benutzt. Als Beispiele für beide Arten des Vorgehens seien

folgende zwei Messungen angeführt mit Meßverhältnissen, welche den in **20** angeführten entsprechen:

$C \parallel a$	$c = d$	$a = b$	α	β	C_i	$L_x = C_i \cdot b \cdot c \cdot 10^{-3}$
0·85 Mf	29·139 Ω	1900 Ω	1·7		0·85075 Mf	47·10 Millihenry
0·86 Mf	29·139 Ω	1900 Ω		21		
					b_i	$L_x = C \cdot b_i \cdot c \cdot 10^{-3}$
1·00 Mf	29·090 Ω	1630 Ω	13·5		1620 Ω	47·13 Millihenry
1·00 Mf	29.090 Ω	1610 Ω		13·3		

Diese Meßschaltung ist zwar für gewisse Meßbereiche bequem, kann jedoch in vielen Fällen Unbequemlichkeiten mit sich führen, welche die folgende leichter vermeidet. Größere Werte von L erfordern nämlich nach der obigen Gleichung sehr hohe Werte geeichten Präzisionswiderstandes, zumal wenn der zur Verfügung stehende Normalkondensator kleinere Werte besitzt. Aus diesem Grunde ist es nur selten möglich, für diese Methode die in der Praxis verbreiteten Meßbrücken zu verwenden, welche drei Brückenzweige enthalten und zwar a und b als dekadische Verhältniswerte (1, 10, 100 Ω), während c einen größeren Meßbereich umfaßt. Diese Schwierigkeit läßt sich durch Parallelschaltung von C zu d beseitigen, doch wird hierdurch die Beziehung komplizierter und die Benutzung meist auf niedere Wechselzahlen (Doppelkommutator) beschränkt.

Nimmt man die Schaltung nach Fig. 47 vor und setzt a, b und c als OHMsche Widerstände von genügender Reinheit ohne merkliche resultierende Nebenkoeffizienten voraus — eine Prüfung und Korrektur kann durch Ermittelung des Wechselstromnullpunktes, wie in **38** angegeben, erfolgen — so geht für das Wechselstromgleichgewicht die Beziehung

$$Z_a : Z_b = Z_c : Z_d \text{ über in } a : b = c : Z_d.$$

Aus den in Bd. I in **145** und **146** gegebenen Ableitungen folgt für Z_a hier der Ausdruck

$$Z_d = \frac{\sqrt{d^2 + (\omega_i\, L_x)^2}}{\sqrt{1 + (\omega_e \cdot C \cdot d)^2 + \omega_e^2 \cdot \omega_i^2 \cdot L_x^2 \cdot C^2 - 2\, \omega_e \cdot \omega_i \cdot C \cdot L_x}}$$

$$= \frac{\sqrt{d^2 + \omega_i^2 \cdot L_x^2}}{\sqrt{(1 - \omega_e \cdot \omega_i \cdot C \cdot L_x)^2 + (\omega_e \cdot C \cdot d)^2}}.$$

In allen den Fällen jedoch, in welchen der Ausdruck $\omega_e \cdot \omega_i \cdot C \cdot L_x$ sehr klein ist gegenüber 1, oder anders ausgedrückt, die Stromresonanz nicht merklich hervortritt, was bei kleineren Werten von ω (nicht über 70 bis 80) wohl hier praktisch stets der Fall ist, reduziert sich jener komplizierte Ausdurck auf $Z_d = \frac{\sqrt{d^2 + (\omega_i \cdot L_x)^2}}{\sqrt{1 + (\omega_e \cdot C \cdot d)^2}}$. Dies liefert bei gleichzeitigem Bestehen von Gleich- und Wechselstromgleichgewicht

$$L_x = C \cdot d^2 \cdot \left(\frac{\omega_e}{\omega_i}\right).$$

Dieselbe eisenfreie Spule wie bei dem letzten Zahlenbeispiel lieferte nach dieser Methode gemessen folgende Zahlen:

$C \parallel d$	$d = c$	α	β	d_i	$L_x = C \cdot d_i^2$
1·00 Mf	216 Ω	7·5		216·97	47·10 Millihenry
1·00 Mf	218 Ω		8·0		

Eine andere, schon früher von PIRANI und von RIMINGTON (1887 Phil. Mag. 24, 54) angegebene Schaltung besteht darin, den Normalkondensator C nicht zu dem g a n z e n Zweig d parallel zu schalten, sondern nur zu einem Teil r des zugeschalteten induktionsfreien Widerstandes, wie Fig. 48 andeutet. Bei der alsdann bestehenden Beziehung

$$L_x = C \cdot r^2$$

gilt auch eine ganz ähnliche Beschränkung des Meßbereiches, wie oben angegeben, insofern die Beziehung um so näher gilt, je weniger die zwischen C und L vorhandene Resonanzwirkung ins Spiel kommt, nur wird hier, wo es sich um Spannungsresonanz handelt, ihr Einfluß auf das Resultat im entgegengesetzten Sinne vorhanden sein.

Bei diesen wechselseitigen Bestimmungen von L und C, welche natürlich ohne weiteres eine Umkehrung in Gestalt der Zurückführung einer unbe-

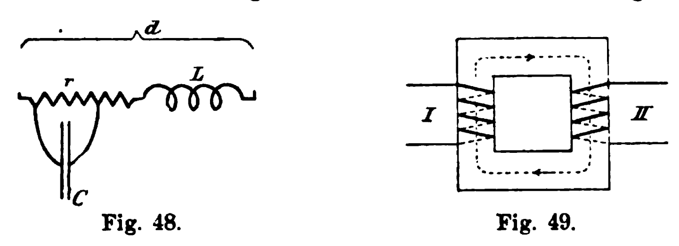


Fig. 48. Fig. 49.

kannten Kapazität auf eine Selbstinduktionsnormale zulassen, hat man sich aber immer gegenwärtig zu halten, daß die Zuverlässigkeit des erhaltenen Wertes in absolutem Maß noch abhängt einmal von der Güte der Kondensatornormale, d. h. der Übereinstimmung ihres wirksamen Wechselstromwertes $\tilde{C}$ mit dem angegebenen nominellen Wert C, der meist mit Gleichspannung bestimmt wird (vgl. **31**), ein zweites Mal von der Annäherung des Wechselverhältnisses $\left(\frac{\omega_e}{\omega_i}\right)$ an die Einheit.

c) Wechselinduktionskoeffizienten.

26. Definition und begriffliche Unterscheidungen.

In engem Anschluß an die in **14** gegebenen Definitionen und Unterscheidungen wäre für den Koeffizienten der wechselseitigen Induktion zwischen zwei elektrisch voneinander getrennten Stromkreisen, etwa der Wickelungen I und II in Fig. 49, die Kraftlinienänderung in der einen Wickelung, z. B. II, maßgebend, wenn die Stromstärke in der anderen Wickelung, z. B. I, sich um die Einheit (1 Amp. = 0·1 CGS-Einheiten) ändert. Die Kraftlinienänderung ausgedrückt in Kraftlinienwindungen $N_{II} \cdot w_{II}$ wird auch hier bei e i s e n f r e i e n Wickelungen direkt proportional mit der Stromstärke J_I zunehmen und einen eindeutigen, oder besser einen von der Stromstärke J_I unabhängigen Koeffizienten M der Wechselinduktion liefern zu

$$M = \frac{N_{II} \cdot w_{II}}{J_I}.$$

In diesem Fall wird auch der Koeffizient insofern symmetrisch sein, als er in gleicher Weise durch Vertauschung der Wickelungen I und II zu

$$M = \frac{N_I \cdot w_I}{J_{II}}$$

erhalten werden kann.

Verläuft das verkettende Kraftlinienfeld N_I^{II} ganz oder teilweise in Eisen, so wird, ähnlich wie in **14** angegeben, nach verschiedenen Richtungen eine Begriffsdifferenzierung erforderlich. Unterscheidet man zunächst nach dem Charakter des Erregerstromes, so wird bei den einfacheren Gleichstromverhältnissen zunächst M abhängig von $\bar{J}$ durch eine Kurve von dem Charakter einer Permeabilitätskurve μ_g (vgl. Fig. 51 in **27**) dargestellt, anstatt durch eine zur Abscissenachse ($\bar{J}$-Achse) parallele Grade. Ferner ist der Fall denkbar, wenn er auch praktisch nur selten in merklichem Maße eintreten wird, daß durch eine Art magnetischer Ventilwirkung die magnetischen Widerstandsverhältnisse andere sind, wenn I, andere wenn II als Erregerwickelung benutzt wird, so daß unter sonst gleichen Verhältnissen die Streufelder $N_I^{II}—N_I$ und $N_{II}^I—N_{II}$ von verschiedener Größe sind, was bedingt, daß

$$M = \frac{w_{II} \cdot N_{II}}{J_I} \text{ und } M = -\frac{w_I \cdot N_I}{J_{II}}$$

voneinander abweichen können.

Bei Wechselstrom als Erregung tritt zu diesen in gleicher Weise bestehenden Unterscheidungen noch als weitere die Unterscheidung in einen ideellen Koeffizienten M_u und in einen wirksamen M_w hinzu, indem in ganz analoger Weise, wie dies in **14** ausgeführt wurde, einmal nur die Magnetisierungskomponente $\bar{J}_u$, das andere Mal die volle gemessene Stromstärke $\bar{J}$ in die obige Beziehung eingesetzt wird.

Auch hier wird man die Bestimmungsmethoden für M am besten einteilen in absolute ohne Benutzung einer Induktionsnormale und in vergleichende mit Benutzung einer solchen. Die ersteren werden, ausgehend von der vorstehend gegebenen Definition für M, durch Bestimmung der rechtsseitigen Größen eine Ermittelung sowohl mit kommutiertem Gleichstrom, als auch mit Wechselstrom zulassen.

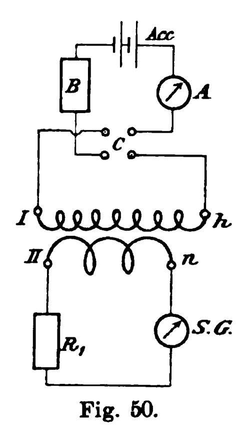


Fig. 50.

27. Messung mit kommutiertem Gleichstrom.

Ein einmaliger Wechsel des Erregerstromes J_I kann mit Hilfe der Schaltung von Fig. 50 zur Ermittelung von M zwischen irgend zwei Wickelungen I und II — natürlich auch von einfachen Stromkreisen oder Einzelwindungen — dienen, indem man die Grundgleichung der Induktion (vgl. I, 1 in **104**) in der Form benutzt, daß man die bei Kommutierung von $\bar{J}_I$ die Wickelung II schneidende Kraftlinienzahl, d. h. die Kraftlinienwindungen $2\ N_I^{II} \cdot w_{II}$, gleich der Integral-EMK, d. i. $\int e_{II} \cdot dt = R_{II} \int i_{II} \cdot dt$ setzt und die Integralströmung $\int i_{II} \cdot dt$ oder die Elektrizitätsmenge, welche durch $\int e_{II} \cdot dt$ in dem Stromkreise II mit dem zeitlich konstant bleibenden Ohmschen Widerstand R_{II} einseitig in Bewegung gesetzt wird, durch ein Schwingungsgalvanometer zur Messung bringt. Diese Schaltung, welche für sehr viele magnetische Untersuchungen zur Ermittelung von Kraftlinienfeldänderungen ($2\ N$) in irgend einem Querschnitt Wichtigkeit besitzt, liefert also die Gleichung

$$2\ N_{II} \cdot w_{II} = R_{II} \int i_{II} \cdot dt = R_{II} \cdot \alpha \cdot C_b \cdot 10^8 = 10^8 \cdot R_{II} \cdot \alpha \cdot C_i \cdot \frac{\tau}{\pi} \cdot k^{\frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\pi}{\lambda}}$$

wenn C_b die ballistische Konstante in Coulomb, bzw. C_i die Stromkonstante des benutzten Schwingungsgalvanometers in Ampere angibt (vgl. II, 1 in **23, 24**).

Um hieraus M zu erhalten, braucht man nur $\overline{J}_I$ in Ampere zu bestimmen. Man erhält alsdann M in Henry zu

$$M = \frac{2\, N_{II} \cdot w_{II}}{2\, J_I} \cdot 10^{-8} \text{ Henry.}$$

Erfolgt die Kraftlinienverkettung von I mit II durch eisenhaltige Raumteile, wie z. B. bei einem Transformator, so muß die Stromstärke $\overline{J}_I$ variiert werden und $M = (M_1 \cdot \mu_g)$ als Funktion von $\overline{J}_I$ aufgetragen werden. Als Beispiel für eine solche Messung seien die Ergebnisse der Untersuchung eines SWINBURNEschen Igeltransformators (ungeschlossener magnetischer Eisenkreis) angeführt. Die Kurve in Fig. 51 stellt den Wechselinduktionskoeffizienten $M = (M_1 \cdot \mu_g)$ und damit gleichzeitig den Verlauf der Permeabilität μ_g des (gemischten) magnetischen Kreislaufes dar.

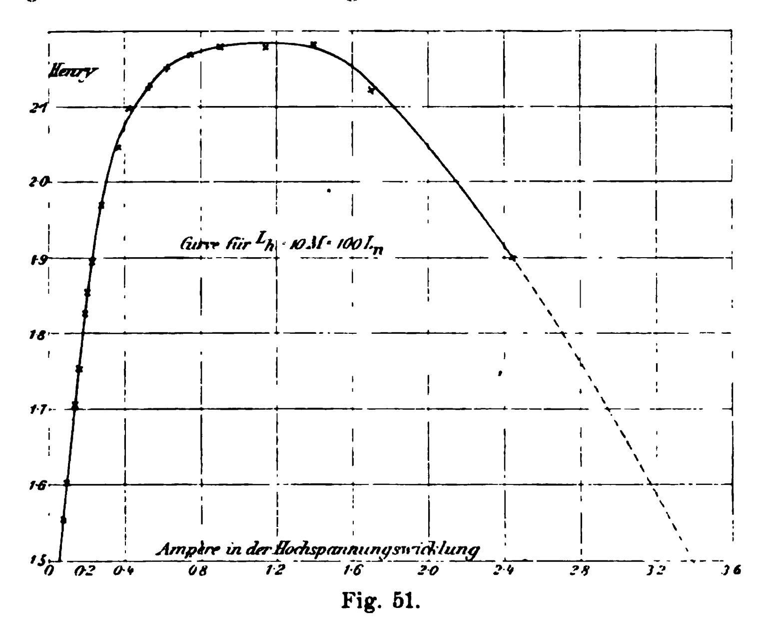


Fig. 51.

Ist das Verhältnis der Windungszahlen bekannt — hier $\frac{w_I}{w_{II}} = \frac{2000}{200} = 10$ —, so kann man aus dem Umstand, daß bei praktisch offenem Transformator die Streuung sehr klein ist, also sehr nahe die Beziehung $N_I^{II} = N_I = N_{II}$ und somit

$$M = \frac{N_I \cdot w_I}{J_{II}} = \frac{N_{II} \cdot w_{II}}{J_I} = \sqrt{\frac{N_I \cdot w_I}{J_I} \cdot \frac{N_{II} \cdot w_{II}}{J_{II}}} = \sqrt{L_I \cdot L_{II}}$$

zutrifft, durch die Kurve sogleich alle 3 Koeffizienten

$$M = \frac{1}{10} L_I = 10\, L_{II}$$

darstellen, indem man nur den Ordinatenmaßstab entsprechend abändert.

Natürlich gelten diese Verhältnisse nur bei praktisch unbelasteter Sekundärwickelung, da sonst für die Eisenmagnetisierung die resultierende Wirkung beider Wickelungen in Betracht kommt, abgesehen von der Streuungszunahme. Die Stromwendung erfolgt zur Vermeidung lästiger

Unterbrechungsfunken am besten durch einen vorübergehend kurzschließenden Kommutator C etwa wie Fig. 52 andeutet.

28. Messung mit Wechselstrom. Nach dem Vorausgegangenen ist zu beachten, daß diese Werte nicht ohne weiteres auf die Wechselstromverhältnisse übertragen werden dürfen, zumal wenn man nicht mit den Maximalwerten der Erregerstromstärke $\tilde{J}_I$, sondern mit ihrem effektiven Mittelwert operiert, dem auch ein Mittelwert von μ_g bwz. $M = M_1 \mu_g$ zugeordnet ist. Um diese praktisch wichtigen mittleren Wechselstromkoeffizienten zu erhalten und etwaige Abweichungen zahlenmäßig feststellen zu können, wird man wiederum von der Induktionsgleichung ausgehen und hier die Formulierung benutzen, welche der EMK der Selbstinduktion entsprechend gebildet ist

$$\tilde{J}_I \cdot \omega \cdot \tilde{M} = \tilde{E}_{II}.$$

Hieraus folgt $\tilde{M} = \frac{\tilde{E}_{II}}{\tilde{J}_I \cdot \omega}$ Henry für $\tilde{E}$ in Volt und $\tilde{J}$ in Ampere.

Wie ersichtlich folgt diese Beziehung auch aus der Gleichung (in **27**)

$$M = \frac{\tilde{N}_{II} \cdot w_{II}}{\tilde{J}_I} \cdot 10^{-8}$$

durch Multiplikation von Zähler und Nenner mit ω.

Um den wahren Wert von M zu erhalten, wird man bei der Messung die Sekundärwickelung so wenig wie möglich belasten und, falls nötig, soweit

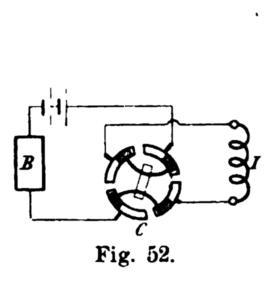


Fig. 52.

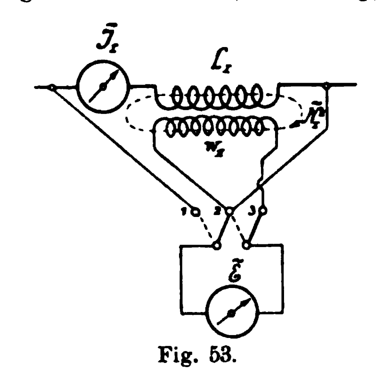


Fig. 53.

Schwachstromwickelungen in Frage kommen, für die Messung von $\tilde{E}_{II}$ in Volt keinen Strom verbrauchenden Spannungszeiger verwenden, sondern ein elektrostatisches Instrument vorziehen. Bei eisenfreien Wickelungen ist die gemessene Stromstärke $\tilde{J}_I$ in Ampere unzerlegt einzusetzen (vgl. **15**), während bei eisenhaltigen Wickelungen zur Erlangung des ideellen Koeffizienten wiederum $\tilde{J}_I \cdot \sin \varphi_I$ einzusetzen ist, das allerdings für u n geschlossene magnetische Eisenkreise nur wenig von $\tilde{J}_I$ verschieden zu sein pflegt.

Eine praktische Schwierigkeit in der Durchführung der Messung nach diesem einfachen und bequemen Verfahren wird bei Anwendung technischer Wechselzahlen aber dann entstehen, wenn M kleine Beträge besitzt und $\tilde{J}_I$ nicht genügend hoch gesteigert werden kann, etwa bei Schwachstromwickelungen, weil alsdann

$$\tilde{J}_I \cdot \omega \cdot \tilde{M} = \tilde{E}_{II} \text{ in Volt}$$

nicht genügend groß ausfällt, um eine leicht durchführbare Messung von $\tilde{E}_{II}$ zu gestatten, namentlich wenn dies elektrostatisch geschehen soll (vgl. hierzu in **2**).

In diesen Fällen hat der Verfasser es wiederum sehr vorteilhaft gefunden, die Kleinheit des Produktes von $\tilde{J}_I \cdot M$ durch eine Erhöhung von ω zu kompensieren und die Messung mit Lichtbogenwechselstrom auszuführen. Hierdurch kann man auch noch recht kleine Werte von M, wie sie namentlich bei völlig oder nahezu eisenfreien Stromkreisen auftreten, ganz bequem bestimmen. Die Meßschaltung unter Verwendung der früher (Fig. 43) angegebenen Wellenstromlichtbogenschaltung wird dann am besten wie in Fig. 53 angegeben ausgeführt, wobei angenommen ist, daß die Primärwickelung zugleich als Selbstinduktionsnormale zur Bestimmung von $\omega = \frac{\tilde{E}_I}{\tilde{J}_I \cdot L_I}$ benutzt werden kann; anderenfalls müßte von L_I, wie früher (24) angegeben, abgezweigt werden und noch ein besonderes Amperemeter zur Bestimmung von ω verwendet werden. Ebenso muß, falls der Meßbereich des verfügbaren Voltmeters $\tilde{E}$ nicht passend ist, $\tilde{E}_I$ durch ein besonderes Voltmeter ermittelt werden und nicht wie hier unter Benutzung des Fünfschalters durch zeitlich nacheinander folgende Messung, wobei nur darauf zu achten ist, daß beide Ablesungen bei demselben Wert von $\tilde{J}_I$ zu erfolgen haben.

Als Zahlenbeispiel einer solchen Messung nach Fig. 53 seien folgende Beobachtungen für den Wechselinduktionskoeffizienten zwischen der Hauptstromspule und der Spannungsspule eines direktzeigenden Wattmeters für 12·5 Amp. von S. & H. bei angenähert Nullstellung angeführt: Die Hauptstromspule wurde zunächst durch Vergleich mit einem anderen bekannten Selbstinduktionskoeffizienten nach dem in 24 Fig. 44 angegebenen Verfahren auf ihre Selbstinduktion untersucht und ihr Koeffizient $\tilde{L}_I$ zu etwa 0·059 Mh ermittelt. Unter Benutzung dieses Koeffizienten wurde nach der Schaltung der Fig. 53 mit Hilfe eines Quadrantenelektrometers gefunden

$\tilde{J}_I$	$\tilde{E}_{1,2}$	$\tilde{E}_{2,3}$
4·9 Amp.	19·7 Volt	37·5 Volt.

Hieraus würde zunächst ω zu etwa $\frac{19 \cdot 7}{4 \cdot 9 \cdot 0 \cdot 059} \cdot 10^3 \sim 68\,000$ folgen.

Weiterhin würde sich

$$M = \frac{\tilde{E}_{II}}{\tilde{J}_I \cdot \omega} = \frac{37 \cdot 5}{4 \cdot 9 \cdot 68} \cdot 10^{-3} \text{ Henry}$$

ergeben für den Fall, daß $\tilde{E}_{2,3}$ die in der Spannungsspule induzierte Spannung darstellen würde. Dies ist aber hier nicht der Fall, weil bei dem fertig abgeglichenen Wattmeter zwischen den verfügbaren Klemmen 2, 3 des Spannungsspulenkreises (mit 1000 Ω) der Spannungsspule mit etwa 100 Ω etwa 1100 Ω vorgeschaltet und zu beiden etwa 6000 Ω parallel geschaltet sind, wie Fig. 54 angibt. Die Folge hiervon ist, daß das durch Wechselinduktion erzeugte $\tilde{E}_{II}$ durch den geschlossenen Spannungsspulenkreis einen Ausgleich hervorruft, so daß die gemessene Klemmenspannung $\tilde{E}_k = \tilde{E}_{2,3}$ zu $\tilde{E}_{II}$ bei einem zu 8·8 Mh angegebenen Selbstinduktionskoeffizienten der Spannungsspule etwa in dem Verhältnis wie $6000 : \sqrt{7200^2 + (68 \cdot 8 \cdot 8)^2}$ steht, d. h. $\tilde{E}_{II}$ ist hier um etwa 22 % größer als $\tilde{E}_{2,3}$ und der Wechselinduktionskoeffizient

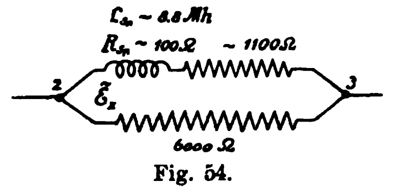


Fig. 54.

$$M = \frac{37{\cdot}5 \cdot 1{\cdot}22}{4{\cdot}9 \cdot 68} \cdot 10^{-3} = 0{\cdot}137 \text{ Mh.}$$

Zu bemerken wäre noch, daß dieser Wert für den Fall, daß die 6000 Ω als Bifilarwiderstand mit merklicher resultierender Kapazität ausgeführt sind, wegen der hierdurch eintretenden Verkleinerung des Außenwiderstandes in Wirklichkeit eher etwas größer ist.

29. Zurückführung von Wechselinduktion auf Selbstinduktion. Die Durchführung der Bestimmung nach der Schaltung von Fig. 53 stellt in gewissem Sinne bereits eine Zurückführung auf eine Selbstinduktionsnormale dar, wenn auch nur mittelbar über den Wert von ω, da sich durch Ersetzung dieses Wertes in der obigen Formel ergibt

$$M = \frac{\tilde{E}_{II}}{\tilde{J}_I \cdot \left(\frac{\tilde{E}_I}{\tilde{J}_I \cdot L_I}\right)} = \frac{\tilde{E}_{II}}{\tilde{E}_I} \cdot L_I.$$

Insofern bildet diese Bestimmung mit Ermittelung des Wertes von ω durch eine Selbstinduktionsnormale den Übergang zu den vergleichenden Methoden.

Diese Zurückführung von M auf L kann auch noch in einer anderen, unmittelbaren Weise erfolgen, wenn man die bereits von MAXWELL (Treatise II Art. 756) angegebene Brückenmethode nach der in Fig. 55 angegebenen Schaltung anwendet. Hierbei wird man auch wieder zur Verbesserung der Meßergebnisse nicht mit einfacher Stromunterbrechung arbeiten, sondern unter Zwischenschaltung eines Doppelkommutators in der in 18 angegebenen Weise.

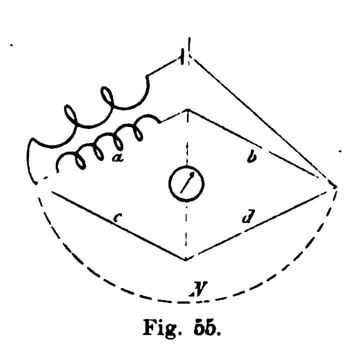


Fig. 55.

Auch müssen zur Erreichung der Vergleichsbeziehung gleichzeitig die Bedingungen für das Gleichstromgleichgewicht $a : b = c : d$ und für das Wechselstromgleichgewicht $Z_a : Z_b = Z_c : Z_d$ erfüllt sein. Da aber die letzte Gleichung in $Z_a : b = c : d$ übergeht, d. h. nur Zweig a Wechselstromkoeffizienten in merklicher Größe aufweist, so liegt hier der Fall ähnlich wie der in 25 betrachtete, nur daß hier die Kompensation des zusätzlichen Wechselstromwiderstandes von a, welcher durch L_a bewirkt wird, nicht durch Kapazität, sondern durch entgegenwirkende Wechselinduktion erfolgt.

Allgemein wird also die im Zweige a wirksame Totalinduktion T sich in der Form schreiben lassen

$$T = L \mp n \cdot M,$$

wenn n das Verhältnis der ungeteilten Stromstärke zu der im Zweig a fließenden Teilstromstärke angibt. Um also zum Ziele zu gelangen, d. h. den von MAXWELL für die Messung benutzten Grenzfall erreichen zu können, in welchem Kompensation eintritt, also $T = 0$ wird oder die Beziehung $L - n \cdot M = 0$ besteht, müssen v o r B e g i n n der eigentlichen Messung bzw. Abgleichung folgende Punkte auf ihre Erfüllung geprüft werden: Abgesehen davon, daß diese Methode im allgemeinen nur für eisenfreie Wickelungen anwendbar ist, muß die Wickelung mit dem g r ö ß e r e n Selbstinduktionskoeffizienten L, dessen Wert bekannt sein muß, in den Brückenzweig a geschaltet werden; ferner muß die Verbindung der Enden zwischen den beiden

Wickelungen (am Verzweigungspunkte der Brücke) so erfolgen, daß die Wechselinduktion der Selbstinduktion entgegenwirkt, d. h. das Minuszeichen bei $n \cdot M$ vorliegt.

Für den Fall der Abgleichung ohne Nebenschluß gilt alsdann die Beziehung

$$M = \frac{1}{n} \cdot L = \left(\frac{c}{a+c}\right) \cdot L.$$

Legt man zur Erleichterung der Abgleichung nach Vorgang von MAXWELL den veränderlichen Nebenschluß N aus induktionsfreiem Widerstand zur Brückenverzweigung (Fig. 55), so nimmt n den Wert $\left(1 + \frac{a}{c} + \frac{a+b}{N}\right)$ an.[1])

d) Kapazitäten.

80. Unterscheidung der Kapazitätswerte.

Ehe auf die verschiedenen Methoden zur Ermittelung der Kapazitätswerte bestimmter Leiteranordnungen eingegangen wird, erscheint es angezeigt, auch hier nochmals darauf hinzuweisen, daß nur in einer beschränkten Anzahl von Fällen der Kapazitätswert eine völlig konstante, d. h. von dem zeitlichen Verlauf der Ladespannungen genügend unabhängige Größe darstellt. Am vollkommensten dürfte dies noch bei gasförmiger Trennungsschicht (Dielektrikum), also bei Luftkondensatoren, zutreffen und angenähert bei völliger Homogenität des flüssigen oder festen Dielektrikums. Bei allen gemischten, sowie bei chemisch komplizierter gebauten Dielektricis ist aber eine merkliche Abhängigkeit von dem Charakter der elektrischen Spannung vorhanden, mit welcher die Kapazität beschickt bzw. gemessen wird, eine Abhängigkeit, die unter Umständen 100 und mehr Prozent von dem unter bestimmten Verhältnissen erhaltenen Wert betragen kann, und wohl in den meisten Fällen einen höheren Prozentsatz erreicht, als der zu erwartende Fehlerbetrag der verwendeten Meßmethode. Wie schon früher (I, 1 in **124**) näher ausgeführt wurde, ist die Ursache der erforderlichen begrifflichen Differenziierung in einen Kapazitätswert $\bar{C}$ bei Dauerspannung bzw. einmaligem Wechsel der Ladespannung und in einen wirksamen Wert $\tilde{C}$ bei Beschickung mit Wechselspannung von bestimmter Wechselzahl durch die bei allen gemischten Dielektricis stärker hervortretenden Rückstandserscheinungen bedingt, welche die disponible Kapazität $\tilde{C}$ veränderlich und zwar im allgemeinen mit wachsender sekundlicher Wechselzahl kleiner erscheinen lassen.

Aus alledem folgt, daß zur eindeutigen Charakterisierung eines gemessenen Kapazitätswertes im allgemeinem nicht nur die Anführung des Meßwertes, sondern auch eine hinreichende Anführung der Meßmethode und Meßverhältnisse gehört.

Dies vorausgeschickt, seien jetzt die verschiedenen Schaltungen zur Ermittelung der Kapazitätswerte wieder in der Reihenfolge behandelt, daß zuerst die Messungen ohne Vergleichsnormale kommen und an diese die Vergleichsmethoden anschließen.

---

1) Weitere Ausführungen über den allgemeinen Fall, daß T nicht gleich Null, sowie über die Auffassung der positiven Totalinduktion als imaginärer Selbstinduktion siehe in des Verfassers „Wechselstrommessungen und magnetische Messungen" in § 41 (Leipzig bei S. Hirzel).

α) Bestimmung der Kapazität ohne Vergleichsnormale.

81. Messung mit Gleichspannung. Die Definition der Kapazität C als Elektrizitätsmenge Q, welche die fragliche Leiteranordnung durch dielektrische Verschiebung an ihrer Oberfläche bindet (vgl. I, 1 in **113**), wenn diese Verschiebung durch die Ladespannung $\bar{E} = 1$ erzeugt wird, liefert die nächstliegende Methode zur Ermittelung von $\bar{C}$ zu

$$\bar{C} \text{ Farad} = \frac{Q}{\bar{E}} \cdot \frac{\text{Coulomb}}{\text{Volt}}.$$

Am bequemsten bedient man sich hierzu der Schaltung in Fig. 56, d. h. man mißt die zur Ladung von C benutzte Gleichspannung $\bar{E}$ mit einem Normalvoltmeter N.V. in Volt und die hierdurch in C erzeugte Ladung Q durch ein Schwingungsgalvanometer zu $C_b \cdot \alpha = C \cdot \frac{\tau}{\pi} \cdot k^{\frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\pi}{\lambda}} \cdot \alpha$ (vgl. in 27), indem man zwangläufig durch einen Schlüssel mit 3 Kontakten eine falsche Verbindung vermeidet.

Bei starken Rückstandserscheinungen, z. B. bei Kabeln, wird der so erhaltene Kapazitätswert von der Schwingungsdauer τ etwas abhängen und mit dieser zunehmen, weil die Bedingung, daß der Entladestromstoß in seinem zeitlichen Verlauf klein gegenüber τ ist, alsdann nicht ausreichend zutrifft.

Fig. 56.

Will man die ungefähre Größe der Rückstandsladung C_r gegenüber der disponiblen Ladung C_d, welche beide zusammen die Gesamtkapazität $\bar{C} = C_d + C_r$ liefern, schon bei dieser Schaltung überblicken, so kann man dies tun, indem man beim Entladen nicht wie gewöhnlich Dauerkontakt gibt, bis das Galvanometer den größten Ausschlag α erreicht hat, sondern nur kurze Kontakte. Am besten wird man zum Vergleich einen guten Kondensator mit heranziehen, ihn anstelle von C setzen und vergleichsweise dasselbe Verfahren mit stetig abnehmender Dauer der Kontakte einhalten, bis die Ausschläge beim letzteren eine kleine merkliche Abnahme aufweisen.

Nebenbei sei erwähnt, daß dieses Vorgehen zu den Vergleichsmethoden hinüberführt, indem die Messung von E hierdurch fortfällt, wenn man bei derselben aber unbekannten Spannung $\bar{E}$ zuerst C_x einschaltet und $Q_x = C_b \cdot \alpha_x$ beobachtet, hierauf C_x durch die Kapazitätsnormale C_n ersetzt und $Q_n = C_b \cdot \alpha_n$ beobachtet. Da außerdem $Q_n = E \cdot C_n$ so folgt hieraus

$$\frac{C_x \cdot \bar{E}}{C_n \cdot \bar{E}} = \frac{Q_x}{Q_n} = \frac{C_b \cdot \alpha_x}{C_b \cdot \alpha_n} \text{ oder } C_x = C_n \cdot \frac{\alpha_x}{\alpha_n}.$$

Bei den Bestimmungen mit Gleichspannung sei auch noch die Möglichkeit erwähnt, durch Umkehrung der von W. v. Siemens angegebenen Bestimmung zur Ermittelung hoher Isolationswiderstände (vgl. II, 1 Seite 312)

$$R = \frac{t}{C \cdot ln\left(\frac{\alpha_0}{\alpha_r}\right)}$$

den Wert einer unbekannten Kapazität C_x zu ermitteln zu

$$C_x = \frac{t}{R_n \cdot ln \frac{\alpha_0}{\alpha_r}} \text{ Farad,}$$

wenn man mit Benutzung eines bekannten großen Normalwiderstandes (z. B. zuverlässigen Graphitwiderstandes) einmal den Ausschlag α_0 bei direkter Entladung, ein zweites Mal den Ausschlag α_r der Restladung bestimmt, wenn C_x sich während t Sekunden durch jenen Widerstand von $R_n \Omega$ entladen hat. R_n in Megohm eingesetzt liefert C_x in Mf.

Für die Wechselstrompraxis werden aber beide Verfahren nur einen orientierenden Wert besitzen und außerdem in Vereinigung mit einer der folgenden Wechselstrombestimmungen Interesse besitzen, um den Unterschied zwischen $\overline{C}$ und $\tilde{C}$ der zu untersuchenden Kapazität festzustellen und daraus wiederum Schlüsse auf das Dielektrikum und seine Rückstandserscheinungen zuzulassen.

33. Wechselstrommethode mit Amperemeter und Voltmeter.

Von den Wechselstrommeßmethoden ohne Vergleichsnormale bildet das nächstliegende Verfahren ein Gegenstück zu der obigen Gleichspannungsmethode, insofern es auch an die Definitionsgleichung für C anknüpft, nur daß dem Wechselstromcharakter entsprechend die Differentialgleichung benutzt und von den Momentanwerten ausgegangen wird. Hierdurch ergibt sich aus

$$Q = E \cdot C \text{ die Beziehung}$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt}(E \cdot C)$$

oder bei zeitlicher Konstanz von C und Ersetzung von $\frac{dQ}{dt}$ durch die Momentanstromstärke i, sowie Bezeichnung der Momentanspannung mit e

$$i = C \cdot \frac{de}{dt},$$

was für symmetrische Wechselspannung $\tilde{E}$ als Ladespannung liefert:

$$\tilde{J} = \tilde{E} \cdot \omega_e \cdot \tilde{C} \text{ (vgl. I, 2 in 144) oder bei Auflösung nach } C$$

$$\tilde{C} = \frac{\tilde{J}}{\tilde{E} \cdot \omega_e}.$$

Für dieses unmittelbare Verfahren ergäbe sich also die einfache Schaltung der Fig. 57, welche nur die Beschickung der zu untersuchenden Kapazität durch eine passende Wechselspannung $\tilde{E}$, Messung der letzteren in Volt, Ermittelung der Ladestromstärke $\tilde{J}$ in Ampere und Feststellung der sekundlichen Polargeschwindigkeit ω_e der Spannung, etwa durch gleichzeitige Messung der Tourenzahl n der Wechselstromdynamo mittels Tachometer voraussetzt. Wäre z. B. bei einem Hochspannungskabelnetz von 6·3 km Länge bei einer Ladespannung von $\tilde{E} = 3020$ Volt, einer sekundlichen Periodenzahl $u = 52$, eine Ladestromstärke $\tilde{J} = 1{\cdot}52$ Amp. beobachtet worden, so ergäbe sich eine wirksame Gesamtkapazität von

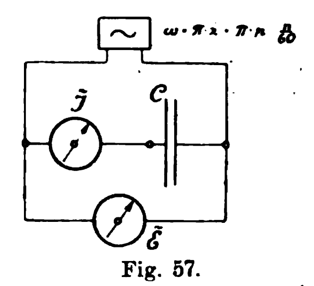


Fig. 57.

$$\tilde{C} = \frac{1{\cdot}52 \cdot 10^6}{3020 \cdot 2\pi \cdot 52} = 1{\cdot}54\,\text{Mf},$$

also eine kilometrische Kapazität zwischen den zwei angeschlossenen Belegungen, etwa 2 Leitungen eines verseilten Drehstromkabels, zu

$$\tilde{C}_1 = \frac{1{\cdot}54}{6{\cdot}3} = 0{\cdot}244\,\text{Mf}.$$

Die praktische Einschränkung in der Anwendung dieser einfachen Methode, soweit die Größenordnung C in Frage kommt, läßt das angeführte Zahlenbeispiel sogleich erkennen, wenn man das über die Messung von Wechselstromstärken Gesagte (**6**) berücksichtigt und bedenkt, daß man bei sehr vielen Leiteranordnungen in der zulässigen Höhe der anzuwendenden Wechselspannung sehr beschränkt ist.

Außerdem ist aber noch auf folgende prinzipielle Seite, welche in ähnlicher Weise bei allen absoluten Methoden zu beachten bleibt, sogleich hier ausdrücklich hinzuweisen. Es betrifft dies die Bestimmung von ω_e, welche nach dem einfachen obigen Verfahren mit einer beträchtlichen Unsicherheit behaftet ist. Die Annahme angenäherter Sinusform der Spannungswelle wird nämlich in den meisten Fällen nicht ausreichend zutreffen. Selbst wenn die Grundform hiervon nicht allzu stark abweichen sollte, so kommen doch im vorliegenden Falle alle kleinen Unebenheiten in Form von Oberschwingungen, wie sie bei den modernen Nutenankern stets mehr oder weniger ausgesprochen vorhanden sind, in Frage, weil die kleinen Spannungsbuckel bei reiner Kapazitätsbelastung in der Stromkurve eine außerordentliche Steigerung erfahren, nämlich angenähert proportional der Wechselzahl jener Oberschwingung, wie eben die oben abgeleitete Ladestromformel sofort erkennen läßt, wenn man $\omega_e = \pi \cdot z$ setzt und bedenkt, daß diese Formel allgemein gilt, also auch für die Oberschwingungen mit 3, 5, 7 usw. facher Wechselzahl gegenüber der Grundschwingung. Eine derartig karrikierte Spannungskurve, wie sie die Oscillographenaufnahmen von Ladestromkurven (siehe Fig. 126 u. 127 in **58**) am besten zur Darstellung bringen, läßt also nicht nur jede Nute bzw. Kraftlinienschwankung aufs Deutlichste hervortreten, sondern auch erkennen, daß im allgemeinen der nach der obigen Beziehung ermittelte Wert von $\tilde{C}$ zu groß ausfallen wird, weil das eingesetzte ω_e, falls nach der Sinusformel berechnet, meist zu klein sein wird gegenüber der Wirklichkeit. Um diesen prinzipiellen Fehler bei diesen und bei allen ähnlichen Meßverfahren möglichst klein zu erhalten, wird man folgende Mittel anwenden können:

Einmal läßt sich der Wert von ω_e durch eine zuverlässige Kurvenaufnahme der Ladespannung (vgl. **51** ff.) ermitteln oder besser noch aus der Kurve der Ladestromstärke (Fig. 126) ableiten und seine Abweichung gegenüber $\pi \cdot z_e$ berücksichtigen. Ist dies nicht angängig, so kann man die Abweichung von ω_e gegenüber dem rechnerischen $\pi \cdot z_e$, oder was dasselbe sagt des Kurvenfaktors c_e von 1 (vgl. in **15**) dadurch verkleinern, daß man die Ladespannung von den Oberschwingungen möglichst reinigt. Dies geschieht durch Selbstinduktion bzw. Resonanz.

Läßt man die verfügbare Wechselspannung sich durch einen stark induktiven Widerstand ausgleichen, so wird bei diesem Ausgleichstrom $\tilde{J}$ nicht ein Herausheben sondern ein Abschleifen etwa ursprünglich bei $\tilde{E}$ vorhandener Oberschwingungen stattfinden, da für diese der Ausgleichwiderstand $Z = \sqrt{R^2 + (\pi \cdot z_i \cdot L)^2}$ angenähert proportional mit der Wechselzahl z_i

wächst. Wird dieser so von Oberschwingungen gereinigte Strom weiterhin durch einen induktionsfreien Widerstand oder auch eine eisenfreie Selbstinduktion geleitet und an deren Enden die zur Ladung benutzte Spannung abgenommen, so wird man in vielen Fällen, namentlich, wenn es sich um die Verwendung kleinerer Spannungen und Stromstärken handelt, wie in den folgenden Fällen, jenen Fehler stark herabdrücken können. Anderenfalls müßte man durch Anwendung einer Transformation geeignetere Spannungsverhältnisse zu schaffen suchen.

In einigen Fällen wird es auch möglich sein, dies direkt durch Resonanz zu erzielen, indem man zu der zu messenden Kapazität C durch Variation von ω und einer zu C in Reihe geschalteten variablen Selbstinduktion L die Verhältnisse für möglichst vollkommene Spannungsresonanz herzustellen und damit gleichzeitig eine Erhöhung und Reinigung der zur Messung benutzten Ladespannung herbeizuführen sucht (vgl. hierzu **11**, sowie I, 2 in **146**). Dieses Mittel wird aber in sehr vielen Fällen nicht anwendbar sein und erfordert außerdem Vorsicht, um eine Gefährdung der Kapazität bzw. des Instrumentariums in Form von Durchschlag bzw. Verbrennen zu vermeiden.

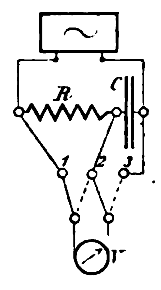


Fig. 58.

Die Schwierigkeit, welche bei allen kleineren Kapazitätswerten, namentlich auch solcher, welche die Anwendung höherer Wechselspannungen $\tilde{E}$ (über 100 bis 200 Volt) ausschließen, sich aus der Kleinheit der Ladestromstärke $\tilde{J}$ ergibt, kann man durch zwei Mittel überwinden, die man entweder einzeln oder vereinigt zur Anwendung bringen kann. Es sind dies einmal die indirekte Messung der Ladestromstärke anstelle der nach unten im Meßbereich weitaus beschränkteren direkten (siehe hierüber in **7**); ein zweites Mal die Anwendung erheblich höherer Werte von ω, etwa wie sie der Lichtbogenwechselstrom zu liefern vermag.

38. Mit indirekter Messung der Ladestromstärke.

Für niedere Betriebsspannungen bei technischen Wechselzahlen und daraus folgenden kleineren Ladestromstärken, welche eine direkte Messung nicht gut zulassen, erfolgt die Messung indirekt mittels induktionsfreien Widerstandes (auch bifilar hier zulässig für etwa $\omega < 500$) und einem elektrostatischen Spannungsmesser von passendem Meßbereich. Als Schaltung wählt man am besten die Anordnung nach Fig. 58. Mit Rücksicht auf günstige Meßverhältnisse wird der induktionsfreie Widerstand R, wenn möglich, so gewählt, daß er in Ω angenähert dem Wechselstromwiderstand der zu messenden Kapazität C, d. h. dem Wert $\frac{1}{\omega \cdot C}$ in Ω, gleichkommt. Ist C nicht annähernd bekannt, so wird R durch Variieren, d. h. durch ein paar orientierende Messungen mit verschiedenen Größenordnungen von R in Ω ermittelt, bis ganz ungefähr $\tilde{E}_{1,2}$ und $\tilde{E}_{2,3}$ übereinstimmen. Ist dies soweit erreicht, daß beide Ausschläge in den guten Meßbereich der Skala fallen, so mißt man $\tilde{E}_{1,2}$ und $\tilde{E}_{2,3}$ in Volt.

Bei Kenntnis von R in Ω erhält man alsdann

$$\tilde{J} = \frac{\tilde{E}_{1,2}}{R}$$

in Amp. und nach der Ladestrombeziehung (in **32**)

$$\tilde{C} = \frac{\tilde{E}_{1,2}}{\tilde{E}_{2,3} \cdot R \cdot \omega} \cdot 10^6 \,\text{Mf.}$$

Hat man z. B. bei Verwendung einer hinreichend sinusförmigen Spannungskurve (vgl. **32** und **15**) unter Verwendung eines Multicellularvoltmeters folgende zusammengehörige Einzelablesungen erhalten, wenn $R = 3000\,\Omega$ beträgt; $z = 140$ also $\omega_e = 440$; $\tilde{E}_{1,2} = 84{\cdot}2$ Volt; $\tilde{E}_{2,3} = 106{\cdot}5$ Volt, so folgt für $\tilde{C}$ bei der Periodenzahl $u = 70$

$$\tilde{C}_{(u=70)} = \frac{84{\cdot}2 \cdot 10^6}{106{\cdot}5 \cdot 3000 \cdot 440} = 0{\cdot}597 \text{ Mf.}$$

Will man gleichzeitig untersuchen, ob die beobachtete Stromstärke $\tilde{J}$ praktisch reiner Ladestrom ist oder auch eine (merkliche) arbeitleistende Komponente enthält — bewirkt durch Umelektrisierungsarbeit (dielektrische Hysterese vgl. I, 1 in **126**), oder auch durch unvollkommene Isolation der Kapazitätsbelegungen voneinander, oder endlich auch durch $J^2 R$ Verluste bei langgestreckter Form der Belegung, so daß der Ladestrom des abliegenden Teiles den vorliegenden durchfließen muß — so braucht man außer $\tilde{E}_{1,2}$ und $\tilde{E}_{2,3}$ nur noch $\tilde{E}_{1,3}$ zu messen, was alsdann, in ganz analoger Weise wie früher (**16**) bei der Selbstinduktion mit Arbeitsleistung im Felde, eine Messung der äquivalenten Phasenverschiebung zwischen $\tilde{J}$ und $\tilde{E}_{2,3}$ einschließt, bzw. eine Messung der elektrischen Leistung, welche innerhalb der Kapazität verloren geht. Würde die Messung im obigen Fall für $\tilde{E}_{1,3}$ anstelle des Wertes $\sqrt{84{\cdot}2^2 + 106{\cdot}5^2} = 135{\cdot}8$ Volt die Spannung 138·0 Volt ergeben, so folgt aus den Ableitungen in **66**

$$\cos\varphi = \frac{\tilde{E}_{1,3}^2 - \tilde{E}_{2,3}^2 - \tilde{E}_{1,2}^2}{2\,\tilde{E}_{1,2} \cdot \tilde{E}_{1,3}} = \frac{600}{17910} = 0{\cdot}0335$$

also φ nahe an 88^0 und weiterhin die in C umgesetzte Leistung

$$\tilde{W}_c = \tilde{E}_c \cdot \tilde{J} \cdot \cos\varphi = \tilde{E}_c \cdot \frac{\tilde{E}_{1,2}}{R} \cdot \cos\varphi$$

$$= \frac{106{\cdot}5 \cdot 84{\cdot}2 \cdot 0{\cdot}0335}{3000} \sim 0{\cdot}10 \text{ Watt.}$$

Auch hier kann man — ähnlich wie früher (Fig. 33 in **15**) bei der entsprechenden Bestimmung von L — die obige Beziehung für $\tilde{C}$ unter Beseitigung der Teilspannungen noch dadurch vereinfachen, daß man R variabel macht und so lange abändert, bis $\tilde{E}_{1,2} = \tilde{E}_{2,3}$ und damit erhält

$$\tilde{C} = \frac{1}{R \cdot \omega_e}.$$

Allerdings muß auch das früher (**15**) über ω_i Gesagte in entsprechender Weise hier bei ω_e beachtet werden.

34. Eigenkapazität elektrostatischer Spannungszeiger.

Bei immer weitergehender Verkleinerung von C und Vergrößerung von R führt diese Methode endlich dazu, die Kapazität des benutzten elektrostatischen Spannungszeigers selbst zu ermitteln, indem man ihn direkt anstelle von C schaltet (Fig. 59) und den Widerstand R leicht ausschaltbar macht durch eine Kurzschlußvorrichtung, etwa 2 Quecksilbernäpfe, welche in ausreichender Entfernung in Paraffin gebettet sind, oder einen gut isolierten Hochspannungsschlüssel, jedoch ohne merkliche Eigenkapazität.

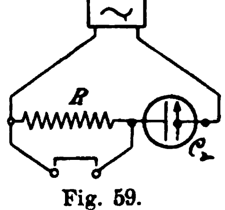


Fig. 59.

Findet man z. B. für $R = 10 \cdot 10^6\,\Omega$ (Graphitwiderstand) bei zugeführter

konstanter Meßspannung — im Zweifelsfalle muß dies nachgeprüft werden und die zweite Messung bei wiedererreichtem gleichem Wert der zugeführten Gesamtspannung erfolgen — folgende Ablesungen am elektrostatischen Spannungszeiger

$$\tilde{E}_1 = 122\cdot3 \text{ Volt, wenn } R \text{ kurzgeschlossen,}$$
$$\tilde{E}_2 = 115\cdot7 \text{ Volt, wenn } R \text{ vorgeschaltet, so folgt}$$

bei $z = 140$ oder $\omega = 440$

$$\tilde{E}_R = \sqrt{\tilde{E}_1{}^2 - \tilde{E}_2{}^2} = 40\cdot0 \text{ Volt} \qquad \text{also}$$

$$\tilde{J} = \frac{\tilde{E}_R}{R} = \frac{40}{10 \cdot 10^6} = 4\cdot0 \cdot 10^{-6} \text{ Amp.} \qquad \text{und}$$

$$\tilde{C}_V (\text{bei } \alpha = 115\cdot7) = \frac{\tilde{J}}{\omega \cdot \tilde{E}_2} = \frac{4\cdot0 \cdot 10^{-6}}{440 \cdot 115\cdot7} = 7\cdot85 \cdot 10^{-5} \text{ Mf.}$$

Zu dem Meßergebnis wäre noch folgendes zu bemerken: Im Interesse möglichst günstiger Meßverhältnisse ist darauf zu achten, daß die Differenz

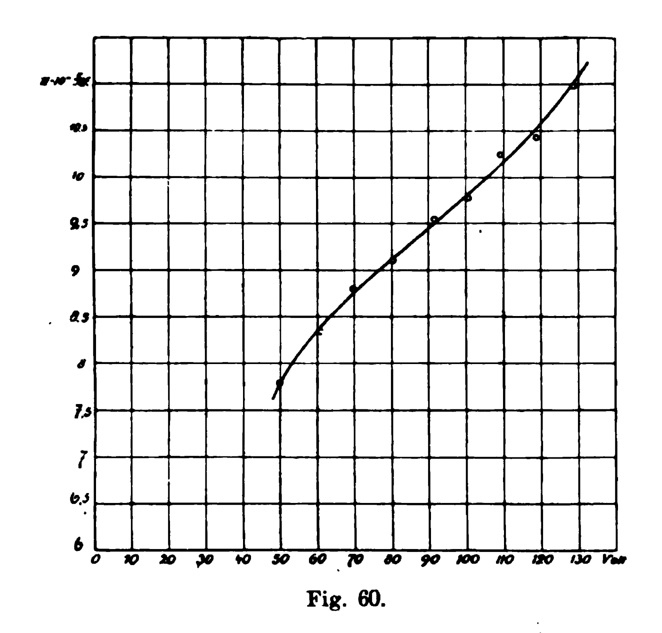


Fig. 60.

$\tilde{E}_1 - \tilde{E}_2$ nicht zu klein gewählt wird, am besten so, daß angenähert $\tilde{E}_2 : \tilde{E}_1 = \sqrt{2} : 1$ wird; sonach wäre es im obigen Fall günstiger R größer zu wählen, falls ein passender Wert vorhanden ist. Auf der anderen Seite darf nicht übersehen werden, daß $\tilde{C}_V$ für den kleineren Ausschlag gilt, d. h. wenn R vorgeschaltet ist, sowie daß $\tilde{C}_V$ keineswegs eine vom Ausschlag unabhängige Größe ist, sondern mit diesem entsprechend der energetischen Grundlage für die Bewegung der Nadel (siehe I, 1 in **136**) zunimmt und zwar gewöhnlich um mehr als 100 % des Wertes bei kleinen Ausschlägen, wie dies die Kurve für C_V in Fig. 60 zeigt, welche die Werte für ein Multicellularvoltmeter nach W. Thomson angibt. Es ist sonach erforderlich die Bestimmung von $\tilde{C}_V$ für eine genügende Anzahl Skalenpunkte durchzuführen, um $\tilde{C}_V$ abhängig von α auftragen zu können. Dem Starkstromtechniker könnte diese Arbeit zwar als recht überflüssig erscheinen, allein vom Stand-

punkt des Wechselstrommeßtechnikers ist die Kenntnis von $\tilde{C}_V$ wertvoll, nicht allein um sehr kleine Kapazitäten von der Größenordnung des $\tilde{C}_V$ bequem durch Vergleichung bestimmen zu können, wie in **37** näher angegeben, sondern auch für die Beurteilung der Korrektion bzw. Zulässigkeit bei indirekter Messung der Stromstärke mit Hilfe des elektrostatischen Spannungszeigers (**7**).

Aus dem Wert von etwa $8 \cdot 10^{-5}$ Mf des vorliegenden Elektrometers geht z. B. hervor, daß sein Wechselstromwiderstand bei $\omega = 440$ den Betrag $\frac{1}{\omega \cdot C_V} = \frac{10^6}{440 \cdot 8 \cdot 10^{-5}} = 28{\cdot}4 \cdot 10^6\ \Omega_s$ betragen würde, der sich bei $\omega = 44000$ (Lichtbogenwechsel) auf etwa $284000\ \Omega_s$ erniedrigen würde. Wird dieses Elektrometer einem induktionsfreien Widerstand von $100\,000\ \Omega = 10^5\ \Omega$ parallelgeschaltet, etwa wie bei Fig. 6, so beträgt der Wechselstromwiderstand Z dieser Kombination für $\omega = 440$

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{Z_V}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{10^5}\right) + \left(\frac{1}{284 \cdot 10^5}\right)^2}} = \frac{10^5}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{284}\right)^2}} \sim 10^5\ \Omega.$$

Für $\omega = 44\,000$ wird

$$Z = \frac{10^5}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2{\cdot}84}\right)^2}} = \frac{10^5}{\sqrt{1{\cdot}124}} = \frac{10^5}{1{\cdot}06}\ \Omega_s,$$ d. h. 6 % kleiner als R.

Wäre die Isolation des benutzten elektrostatischen Spannungszeigers oder Elektrometers nicht ausreichend groß, d. h. nicht wenigstens gleich $100 \cdot R$, also im obigen Zahlenbeispiel nicht $> 10^9\ \Omega$, so würde das so ermittelte $\tilde{C}_V$ die scheinbare, aber nicht die w a h r e Kapazität sein. Die Untersuchung der Größenordnung des Isolationswiderstandes erfolgt am besten durch Beobachtung der Selbstentladung des elektrostatischen Spannungszeigers nach gleichzeitiger beiderseitiger Abschaltung einer Gleichspannung mit Benutzung der von W. v. SIEMENS angegebenen Methode zur Messung hoher Isolationswiderstände (vgl. **31** oder auch II, 1 in **191**).

35. **Messung mit hohen Periodenzahlen am Wellenstromlichtbogen.**

Das zweite Verfahren, auch kleine Werte von C der Messung noch bequem zugänglich zu machen, besteht darin, die zur Messung benutzte Wechselzahl bzw. das ω_e in der Ladestromgleichung $\tilde{J} = \tilde{E} \cdot \omega_e \cdot C$ auf eine höhere Größenordnung gegenüber den technischen Wechseln zu bringen. Die einfachste Methode zur Erzeugung symmetrischer Wechselspannung von so hoher Polargeschwindigkeit ($\omega = 10^4$ bis 10^6) besteht in der Verwendung der Wechselspannung im parallelen Schwingungskreise zum Wellenstromlichtbogen (vgl. **11** und **24**). Wie schon früher hervorgehoben, bieten diese hohen Werte von ω ein ausgezeichnetes Mittel, um kleine Werte von $\tilde{C}$ bequemer meßbar zu machen; dies gilt namentlich von Luftkondensatoren, als welche auch elektrostatische Spannungszeiger anzusehen sind, und von anderen Kapazitäten, bei denen keine erheblichen Unterschiede zwischen $\bar{C}$ und $\tilde{C}$ bzw. zwischen den Werten von $\tilde{C}$ bei erheblich verschiedenen Wechselzahlen vorliegen, da die Werte von R nach der Methode in **34** erheblich herabgedrückt werden.

Weiterhin bietet diese Meßanordnung aber ein vortreffliches Mittel — und hierin dürfte ihr Hauptwert liegen — um bei vielen Leiteranordnungen,

namentlich Meßwiderständen, die kleinen Nebenkoeffizienten, welche bei niederem ω gegenüber dem Ohmschen Widerstand zu stark zurücktreten und der Messung zu schwer zugänglich sind, hervorzuheben und der Messung gut zugänglich zu machen. Will man z. B. bei einer bestimmten Widerstandsanordnung R_x den resultierenden Nebenkoeffizienten (II, 1 in **15**) zur Messung bringen, so wird man eine geeignete (eisenfreie) Selbstinduktionsnormale L in den Schwingungskreis der Fig. 43 einschalten, von dieser abzweigen, wie Fig. 61 andeutet, und den Wechselstromwiderstand $Z = \frac{\tilde{E}}{\tilde{J}_R}$ des Widerstandskreises in Ω bestimmen, wobei die Polargeschwindigkeit nach früherer Angabe (**23**) zu

$$\omega_i = \frac{\tilde{E}}{\tilde{J} \cdot L} \text{ gefunden wird.}$$

Der Wert von Z gegenüber dem mit Gleichstrom, etwa in der Brücke, bestimmten Ohmschen Widerstand $R_x + R_a$ läßt sofort erkennen, ob Kapazität oder Selbstinduktion den resultierenden Koeffizienten bestimmt, je nachdem

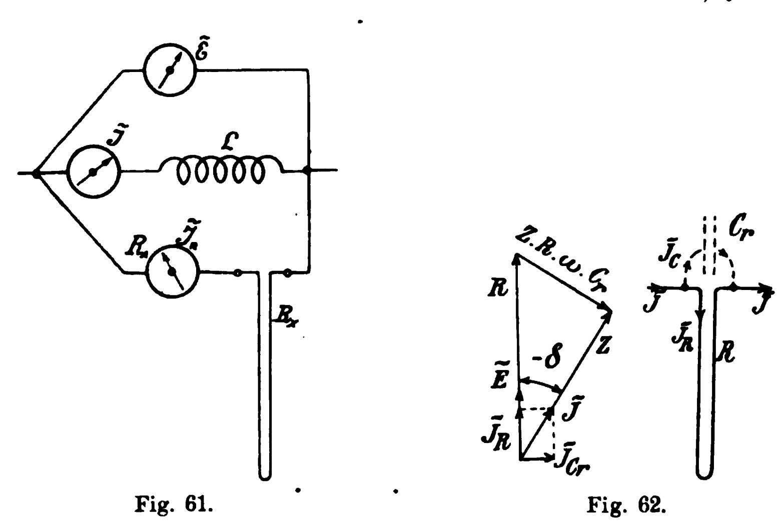


Fig. 61. Fig. 62.

Z kleiner oder größer ist als $R_x + R_a$. Ist z. B., wie bei bifilarem Widerstand gewöhnlich, Z kleiner als $R = R_x + R_a$, so folgt für die parallel zu R vorhanden gedachte „resultierende Kapazität" C_r nach der Beziehung im Kreisdiagramm der Fig. 62

$$\tilde{C}_r = \frac{\sqrt{R^2 - Z^2}}{Z \cdot R \cdot \omega_e}.$$

Auf diese Weise wurden die früher (II, 1 in **16**) angegebenen resultierenden Werte für C_r verschiedener Ausführungsarten von Präzisionswiderständen bestimmt.

Zu beachten bleibt auch hier, daß der Zahlenwert von C_r insofern mit einer kleinen Unsicherheit behaftet ist, als $\omega_e = \omega_i$ gesetzt ist, was trotz Resonanz nicht genau zuzutreffen braucht.

36. Zurückführung auf Selbstinduktionsnormale. Die Zurückführung von C auf L in der Brückenschaltung wurde bereits früher (**25**) besprochen. Hier sei daher nur noch auf die Möglichkeit hingewiesen, den Wert von $\tilde{C}_x$ auf eine Selbstinduktionsnormale bei Reihen-

schaltung beider zurückzuführen, ein Fall, der z. B. im Schwingungskreise des Wechselstromlichtbogens gegeben ist (vgl. Fig. 43).

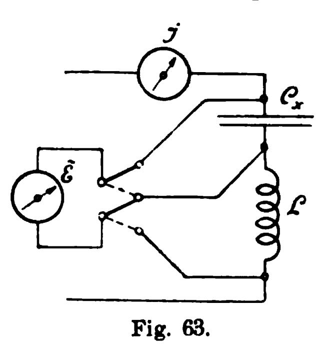


Fig. 63.

Wird die Wechselstromstärke $\tilde{J}$ gemessen, welche C_x und L in Reihenschaltung durchfließt (Fig. 63), ferner die Wechselspannung $\tilde{E}_C$ und $\tilde{E}_L$ — über die Heraussiebung von $\tilde{E}_C$ aus E_C im Falle der Benutzung des Wellenstromlichtbogens als Stromquelle anstelle eines Erzeugers symmetrischer Wechselspannung siehe in **116** — so liefern die beiden Gleichungen

$$\tilde{J} = \tilde{E}_C \cdot \omega_e \cdot \tilde{C}_x \quad \text{und}$$

$$\tilde{J} = \frac{\tilde{E}_L}{\omega_i \cdot L}$$

zunächst die Beziehung

$$\tilde{C}_x = \frac{1}{L} \cdot \frac{\tilde{E}_L}{\tilde{E}_C \cdot \omega_e \cdot \omega_i}.$$

Hält man für den Fall der Kurvenreinigung durch Resonanz die Gleichsetzung von ω_e und ω_i für zulässig, so folgt

$$\omega_e = \frac{\tilde{J}}{\tilde{E}_C \cdot \tilde{C}_x} = \omega_i = \frac{\tilde{E}_L}{\tilde{J} \cdot L} \quad \text{und hieraus}$$

$$\tilde{C}_x = \frac{1}{L} \cdot \frac{\tilde{E}_C \cdot \tilde{E}_L}{\tilde{J}^2}.$$

Diese Beziehung ist von Janet (1902 Compt. Rend. 134, Seite 452) in vereinfachter Form zur Bestimmung kleiner Selbstinduktionskoeffizienten durch Zurückführung auf eine Kondensatornormale angegeben worden. Indem er nämlich annimmt, daß bei Resonanz $\tilde{E}_C = \tilde{E}_L$, was jedoch nach meinen Untersuchungen am Wellenstromlichtbogen nicht ausreichend genau zutrifft, setzt er

$$L_x = C \cdot \left(\frac{\tilde{E}_L}{\tilde{J}}\right)^2.$$

Mit Rücksicht auf die Variabilität des wirksamen Wertes $\tilde{C}$ abhängig von der Wechselzahl erscheint mir, abgesehen von den obigen Einschränkungen, diese Methode zu ungenau und der früher angegebenen Bestimmung durch Vergleichung zweier L-Werte (**24**) entschieden unterlegen. Hingegen erscheint die obige Zurückführung von $\tilde{C}_x$ auf eine zuverlässige L-Normale weniger Bedenken ausgesetzt.

β) Vergleichsmethoden.

87. **Ohne Brückenschaltung; mit elektrostatischem Spannungszeiger.**

Handelt es sich um den Vergleich zweier Kapazitätswerte C_1 und C_2, welche groß gegenüber der Kapazität des elektrostatischen Voltmeters sind, so geschieht dieser am einfachsten wie folgt: Die Normalkapazität, etwa C_1, wird mit der zu messenden, etwa C_2, in Reihe geschaltet, an eine passende Wechselspannungsquelle gelegt und mit Hilfe eines Fünfschalters (Fig. 64) werden die beiden Spannungen $\tilde{E}_1$ und $\tilde{E}_2$ gemessen. Da nämlich die Stromstärke $\tilde{J}$, welche die beiden Kapazitäten durchsetzt, die gleiche ist, so müssen

die Spannungen $\tilde{E}_1 = \tilde{J} \cdot Z_1$ und $\tilde{E}_2 = \tilde{J} \cdot Z_2$ im Verhältnis der Wechselstromwiderstände Z stehen oder, da $Z = \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)$,

$$\tilde{E}_1 : \tilde{E}_2 = \frac{1}{\omega \cdot C_1} : \frac{1}{\omega \cdot C_2}, \text{ d. h. } C_2 = C_1 \cdot \frac{\tilde{E}_1}{\tilde{E}_2} \text{ sein.}$$

Will man wiederum überprüfen, ob die Phasenverschiebung zwischen $\tilde{J}$ und $\tilde{E}_1$ bzw. $\tilde{E}_2$ gleich groß und praktisch 90° beträgt, so braucht man außer $\tilde{E}_1$ und $\tilde{E}_2$ nur noch die Summenspannung $\tilde{E}_{1,2}$ zu messen. Eine merkliche und nicht durch Spannungsschwankung bedingte Abweichung von $\tilde{E}_1 + \tilde{E}_2$ liefert in der in **33** angegebenen Weise die cos-Komponente für $\tilde{C}_2$ und damit den Wattverbrauch im Dielektrikum, sowie den Unterschied zwischen der reinen und der scheinbaren Kapazität.

Ist der zu messende Kapazitätswert sehr klein und etwa von der Größenordnung der Eigenkapazität des elektrostatischen Voltmeters, so wird er am besten durch Reihenschaltung mit dem Voltmeter bestimmt, wie Fig. 65 angibt. Hierbei wird also die Eigenkapazität $\tilde{C}_1$ des Voltmeters bei dem kleineren Ausschlag als Normale benutzt und aus der Eichkurve (Fig. 60)

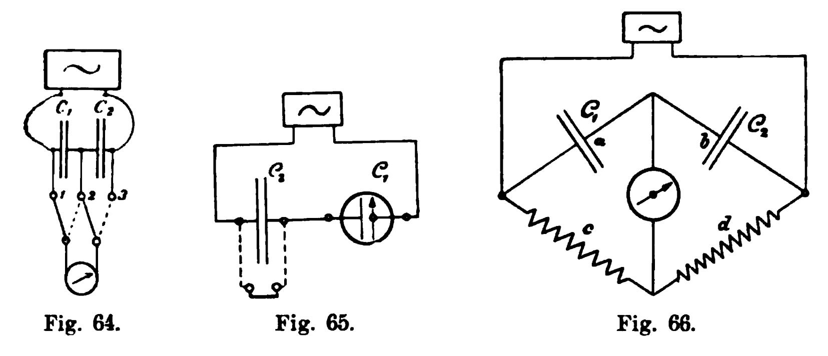


Fig. 64. Fig. 65. Fig. 66.

entnommen. Findet man z. B. bei Kurzschluß von C_2 die als konstant vorausgesetzte zugeführte Wechselspannung $\tilde{E} = 120{\cdot}0$ Volt; bei Vorschaltung von C_2 die Spannung $\tilde{E}_1 = 102{\cdot}0$ Volt, so folgt nach dem Obigen

$$\tilde{C}_2 : \tilde{C}_1 = \tilde{E}_1 : (\tilde{E} - E_1) \text{ oder } \tilde{C}_2 = \tilde{C}_1 \cdot \frac{102}{18} = \tilde{C}_1 \cdot 5{\cdot}67.$$

Beträgt $\tilde{C}_1$ nach der Kapazitätskurve (beim Ausschlag 102) $6{\cdot}8 \cdot 10^{-5}$ Mf, so folgt

$$\tilde{C}_2 = 6{\cdot}8 \cdot 5{\cdot}67 \cdot 10^{-5} \text{ Mf} = 38{\cdot}6 \cdot 10^{-5} \text{ Mf}.$$

Auch hier wird vorausgesetzt, daß die Dielektrika von C_1 und C_2 nicht zu sehr verschieden sind hinsichtlich Rückstandsbildung und Isolation, da sonst der errechnete Wert von $\tilde{C}_2$ nur eine scheinbare Kapazität darstellt, die von der eigentlichen mehr oder weniger abweicht.

Diese Methode ist namentlich für den Meßtechniker wertvoll, um kleine Hilfskapazitäten zu bestimmen, welche als Vorschaltkapazitäten zur Erweiterung des Meßbereichs von elektrostatischen Voltmetern nach oben dienen sollen (vgl. in **4** Fig. 6).

38. **Brückenschaltungen.** Die Vergleichung von Kapazitäten in der Wechselstrombrücke — meist unter Benutzung eines Doppelkommutators mit Akkumulatoren und Galvanometer (**18**), oder des Telephons als Brückeninstrument, seltener durch einfachen Spannungswechsel beim An- bzw. Abschalten einer Gleichspannung

— erfolgt auf Grund des Wechselstromgleichgewichtes, wie es früher (**18 ff.**) in ähnlicher Weise bei den Methoden zur Messung der Selbstinduktion zur Anwendung gelangte.

Die älteste dieser Vergleichsschaltungen ist die nach DE SAYTY, bei welcher die beiden zu vergleichenden Kapazitäten C_1 und C_2 in die Brückenzweige a und b geschaltet werden (Fig. 66) und das Verhältnis der induktionsfreien Widerstände $c:d$ so lange geändert wird, bis das Brückeninstrument bei einem beliebigen endlichen Wert von $\frac{de}{dt}$ bzw. von ω_e in Ruhe bleibt. Alsdann muß die Beziehung bestehen

$$Z_a : Z_b = Z_c : Z_d$$

$$\frac{1}{\omega \cdot C_1} : \frac{1}{\omega \cdot C_2} = c : d$$

$$C_2 = C_1 \cdot \frac{c}{d}$$

Nach meinen Untersuchungen (1895 Ann. d. Ph. u. Ch. 54, 599) ergibt aber diese Schaltung bei Kapazitäten mit verschiedenartigem Dielektrikum unbefriedigende, ja zum Teil völlig unsichere Resultate. Namentlich ist sie auch zum Vergleich kleiner Kapazitätswerte, wie sie etwa bei Bestimmung von Dielektrizitätskonstanten auftreten (vgl. ETZ 1896, 483) ungeeignet, weil

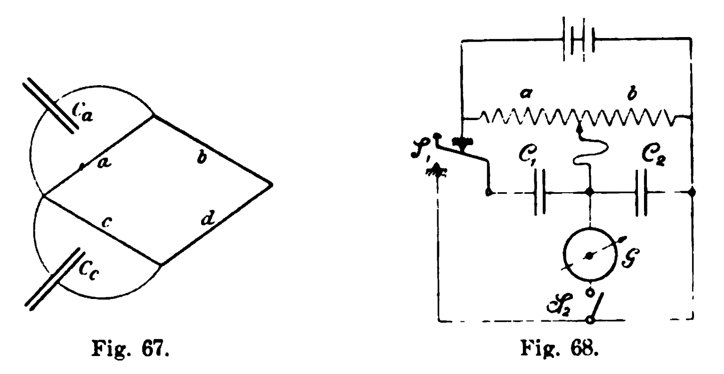


Fig. 67. Fig. 68.

bei Bifilarwiderständen die resultierende Kapazität der beiden Widerstandszweige c und d erhebliche Fehler verursachen kann. Will man diese vermeiden bzw. korrigierbar machen, so empfiehlt sich die Abänderung nach Fig. 67, worin a und c **sehr große** und möglichst gleiche Widerstände, auch Bifilarwiderstände, darstellen, zu denen die zu vergleichenden Kapazitäten C_a und C_c parallel geschaltet werden. Dies bietet den Vorteil, daß zunächst Gleichstromgleichgewicht

$$a : b = c : d$$

eingestellt werden kann; hierauf zunächst unter Fortlassung von C_a und C_c der sogenannte Wechselstromnullpunkt bestimmt werden kann, der in der Regel merklich von jenem abweicht und die Verschiedenheit der resultierenden Kapazitäten in den Brückenzweigen berücksichtigt.

Die Abgleichung mit Wechselstrom nach Anschalten von C_a und C_c erfolgt dann in der früher (**19**, **20**) angegebenen Weise, jedoch wird hier als Nullpunkt für die Interpolation der „Wechselstromnullpunkt“ zugrunde gelegt.

Nach dem Früheren ergibt sich als Beziehung

$$Z_a : Z_c = Z_b : Z_d.$$

$$\frac{a}{\sqrt{1 + (\omega \cdot a \cdot C_a)^2}} : \frac{c}{\sqrt{1 + (\omega \cdot c \cdot C_c)^2}} = b : d$$ neben der obigen; somit

$$C_a : C_c = c : a$$

Weiteres siehe ETZ 1896, 500.

39. Methode nach W. Thomson.

Zu den Vergleichsmethoden mit Brückenschaltung, jedoch meist unter Benutzung eines besonderen rotierenden Schlüssels, der die in Fig. 68 getrennt angedeuteten Operationen selbsttätig und in rascher Wiederholung ermöglicht, gehört auch das Kompensationsverfahren von W. THOMSON: Man ladet C_1 und C_2 mit Gleichspannungen, die durch Teilung des induktionsfreien Widerstandes in a und b variiert werden können, so daß die Ladung

von C_1 durch $Q_1 = C_1 \cdot E \cdot \frac{a}{a+b}$ und

von C_2 durch $Q_2 = C_2 \cdot E \cdot \frac{b}{a+b}$

gegeben ist. Durch Drücken von S_1 erfolgt ein mehr oder weniger vollständiger Ausgleich zwischen Q_1 und Q_2 durch wechselseitige Entladung.

Für $Q_1 \lessgtr Q_2$ wird bei Drücken von S_2 das Schwingungsgalvanometer G einen Ausschlag nach rechts bzw. links zeigen. Für $Q_1 = Q_2$ wird $\alpha = o$ und für diesen Fall besteht die Beziehung:

$$C_1 \cdot \overline{E} \cdot \frac{a}{a+b} = C_2 \cdot \overline{E} \cdot \frac{b}{a+b}$$

$$C_1 = C_2 \cdot \frac{b}{a}$$

Bei einer Verschiedenartigkeit des Dielektrikums von C_1 und C_2 ist auch hier der Einfluß der Wechsel- bzw. Umdrehungszahl deutlich merkbar, d. h. das Verhältnis $\tilde{C}_1 : \tilde{C}_2$ ist eine Funktion der Betriebsverhältnisse und namentlich der Wechselzahl.

D. Wechselzahl, Polargeschwindigkeit und Schlüpfung.

40. Einteilung der Meßmethoden.

Die vorausgegangenen Betrachtungen lassen erkennen, daß beim Wechselstrom die Änderungsgeschwindigkeit eine wichtige charakteristische Größe darstellt, die nicht nur die Erscheinungen beeinflußt, sondern auch bei vielen Meßmethoden in das Endergebnis als Faktor eingeht und eine hinreichend genaue experimentelle Bestimmung oder Messung erheischt. Bei dieser elektrischen Änderungsgeschwindigkeit wird man zunächst eine Zweiteilung vornehmen können, je nachdem es sich um die absolute Größe handelt, wie z. B. in einem einfachen bzw. im primären Stromkreis, oder ob die Differenzgeschwindigkeit bei zwei elektromagnetisch miteinander gekuppelten Stromkreisen in Frage steht, die wie Ständer- und Läuferwickelung bei Asynchronmotoren eine von der elektromagnetischen (Drehfeld-)Geschwindigkeit abweichende mechanische Geschwindigkeit des Sekundärkreises zulassen. Jene absolute Größe wird auf die Sekunde bezogen entweder als Wechselzahl z bzw. halbe Wechselzahl u (Frequenz oder Periodenzahl), oder als Polar-

geschwindigkeit ω zu bestimmen sein, diese Relativgröße als eine meist mit Schlüpfung oder Schlupf bezeichnete Differenzgeschwindigkeit.

Zur Charakterisierung einer Wechselstromgröße (Spannung $\tilde{E}$ oder Stromstärke $\tilde{J}$) dient neben den Maximal- bzw. Effektivwerten in erster Linie meist die Anzahl z der in der Sekunde stattfindenden Richtungswechsel ohne Rücksicht auf die Kurvenform. Neuerdings hat man die Wichtigkeit der Bestimmung der letzteren für alle genaueren Wechselstrommessungen immer mehr erkannt, zumal die elektrischen Vektorgeschwindigkeiten ω_e bzw. ω_i, die in alle Ableitungen und Formeln für die übrigen Wechselstromgrößen eingehen (siehe hierzu in **15**, **28**, **32**), neben der Wechselzahl z den Kurvenfaktor c_e bzw. c_i enthalten, der durchaus nicht immer ausreichend mit der Einheit übereinstimmen wird (siehe z. B. in **15**). Daraus folgt weiterhin, daß die rein elektrischen Bestimmungen der Änderungsgeschwindigkeiten, wie sie im folgenden unter 3 angeführt sind, zunächst jene elektrische Polargeschwindigkeit ω_e bzw. ω_i ergeben, aus denen mit Hilfe der Kurvenfaktoren c_e bzw. c_i erst in zweiter Linie die Wechselzahl ableitbar ist, so daß bei Einsetzung des Wertes π für diese die errechnete Wechselzahl ohne besondere Kurvenformuntersuchung nur unter dem nötigen Vorbehalt als zutreffend angesehen werden kann (siehe auch unter **44** und **45**).

Man kann also die Bestimmungsmethoden zunächst danach einteilen, ob in erster Linie die Wechselzahl z gemessen und hieraus mit Hilfe von c_e bzw. c_i der Wert von ω_e bzw. ω_i abgeleitet wird, oder ob in erster Linie aus rein elektrischen Messungen ω_e bzw. ω_i ermittelt und hieraus mit Hilfe von c_e bzw. c_i der Wert von z abgeleitet wird. Weiterhin wird die Messung von z eine Einteilung der Methoden in nicht-elektromagnetische und in magnetische zulassen, wenn man die rein mechanischen, ferner die stroboskopischen und die akustischen Methoden als nicht-elektromagnetische zusammenfaßt, im Gegensatz zu den Methoden, welche die elektromagnetischen Impulse zur Erregung mechanischer Schwingungssysteme, meist unter Zuhilfenahme der Resonanzerscheinung benutzen. Die Grenze ist aber auch hier wiederum nicht scharf zu ziehen, da die rein optischen Methoden unter Benutzung des Wechselstrom-Funkens bzw. -Lichtbogens in Verbindung mit Winkelspiegeln von gemessener Tourenzahl als Übergang bzw. als Verbindung beider angesehen werden können.

Die Auswahl der Methode wird einerseits von der Höhe der sekundlichen Wechselzahl, andererseits von dem Ort der Messung, ob neben der benutzten Wechselstromquelle, oder entfernt von dieser ausgeführt, abhängen.

a) Wechselzahl.

41. Mechanische und stroboskopische Meßverfahren.

Beim technischen Wechselstrom und allgemeiner beim Maschinenwechselstrom ist eine der nächstliegenden Methoden der Messung von z, die auch jetzt vielfach noch Anwendung findet, die Ermittelung der sekundlichen Umdrehungszahl $\frac{n}{60}$ der Wechselstromdynamo durch Tourenzähler oder Tachometer und die Zählung der Wechselpole $2p$ der Dynamo, woraus $z = 2p \cdot \frac{n}{60}$ oder $u = \frac{p \cdot n}{60}$ folgt, wenn p die Anzahl der Polpaare bezeichnet. Die Ermittelung der Umdrehungszahlen ist schon eingehend in der ersten Abteilung dieses Bandes (siehe II, 1 in **211**) behandelt worden, weshalb hier

nur darauf zu verweisen ist. Diese Methode ist aber nur direkt am Generator anwendbar. Soll die Tourenzahlmethode entfernt vom Generator zur Bestimmung von z Anwendung finden, so ist dies zuverlässig nur mit Hilfe eines Synchronmotors möglich, dessen Touren $\left(\frac{n}{60}\right)$ in Verbindung mit der Zahl $2p$ seiner Pole den Wert wie oben liefern.

Steht kein Synchronmotor zur Verfügung, oder erscheint sein Betrieb zur Bestimmung von z zu umständlich, so kann die Bestimmung auch mit einem anderen kleinen Hilfsmotor mit bequem regulierbarer Tourenzahl n, am besten wohl Nebenschluß-Gleichstrommotor, erfolgen, wenn man von diesem ein Tachometer und eine stroboskopische Scheibe antreiben läßt. Besteht die letztere z. B. in einfacher Weise aus einer hellen Scheibe mit einem dunklen Segment, etwa wie in Fig. 69 angedeutet, und wird sie von einem Wechselstrom-Lichtbogen beleuchtet, der aus dem Wechselstromkreis mit dem zu messenden z gespeist wird, so bewirkt die mit z übereinstimmende Variation der Beleuchtungsintensität, daß die Scheibe für ganze Verhältniszahlen $m = 1, 2, 3, 4$ usf. von z zur Motortourenzahl $\frac{n}{60}$ still zu stehen scheint und so viel Sektoren gleichmäßig über den Umfang verteilt sichtbar werden, als jene Verhältniszahl m beträgt, z. B. für $z:\left(\frac{n}{60}\right) = 4$ auch 4 Sektoren. Hieraus folgt die Bestimmung zu $z = \frac{n}{60} \cdot m$.

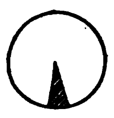


Fig. 69.

Diese Ausführung der Messung auf stroboskopischem Wege besitzt aber immer noch eine für viele Zwecke zu große Umständlichkeit. Ohne Benutzung eines Motors und Tachometers ist dieses stroboskopische Verfahren von R. Wachsmuth (1901 Ann. d. Ph. S. 323) zur Messung der Wechselzahl z eines Wechselstrom-Lichtbogens durch Zurückführung auf die Schwingungsformel einer eingespannten Feder von der Länge l cm und der Dicke d cm mit Hilfe der Gleichung $z = 7920 \frac{d}{l^2}$ ausgebildet worden.

Die mit einem kleinen weißen Papierstückchen beklebte Stahlfeder (Uhrfeder) wird eingespannt, wie Fig. 70 andeutet, durch Zupfen in Schwingungen versetzt und l so lange variiert, bis das Papierstückchen in jenem Wechselstrombogenlicht scheinbar stillzustehen scheint. Im allgemeinen ist aber — besonders bei dünnen Federn — noch ein Korrektionsglied λ in der obigen Formel anzubringen, da das Papierstückchen die Schwingungszahl der Feder etwas herabdrückt. Diese Korrektion muß auf akustischem Wege erfolgen, indem man neben jener schwach belasteten Feder eine ganz unbelastete auf gleiche Tonhöhe einstellt, die Längendifferenz λ dieser beiden Federn ermittelt und bei der mit dem Papierstückchen belasteten Feder zu l hinzuaddiert, also erhält

$$z = 7920 \cdot \frac{d}{(l+\lambda)^2}.$$

Fig. 70.

Der brauchbare Meßbereich dieser Methode ist übrigens ziemlich beschränkt, da eine zuverlässigere Bestimmung zwar für alle

Wechselzahlen unter 100, weniger gut aber für höhere (praktische Grenze etwa $z = 150$) durchführbar ist.

Für höhere Wechselzahlen kommen im Laboratorium noch folgende Bestimmungsmethoden in Frage, die den Übergang zu den elektromagnetischen Wechselzahlzeigern bilden:

42. Akustische und optische Meß-methoden. Die Erzeugung eines Tones durch den zu messenden Wechselstrom mit Hilfe seiner elektromagnetischen Wirkung. Diesen Ton, wie er schwach bei allen Spulen, stärker bei eisenhaltigen Spulen auftritt (Summen der Wechselstromdynamos, Transformatoren, Bogenlampen usw.) und am einfachsten durch Anschluß eines Telephons an den Wechselstromkreis erzeugt wird, bestimmt man in seiner Höhe nach einer der hierfür geeigneten Methoden. Als solche sind namentlich zu nennen: die Methode der Schwebungen durch

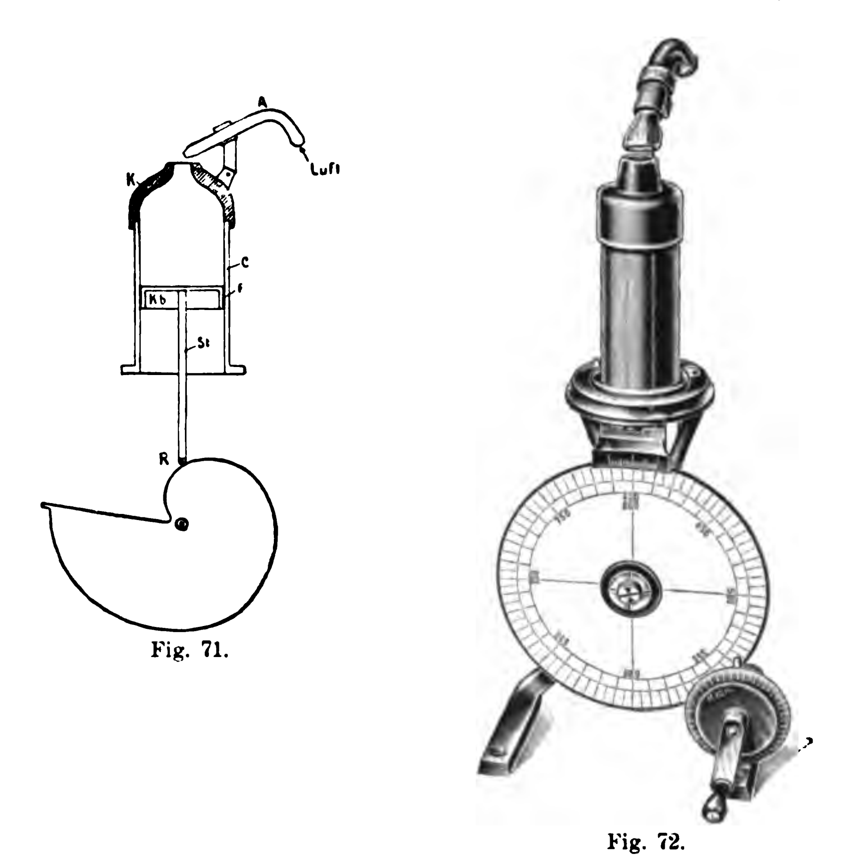


Fig. 71.

Fig. 72.

Vergleich mit den Tönen von Normalstimmgabeln (weiteres siehe Lehrbuch der pr. Ph. von F. KOHLRAUSCH, 9. Aufl., S. 214), oder (weniger genau) von Normalsaiten (Monochorden), oder von Normalpfeifen. Ferner läßt sich die Bestimmung auch ausführen durch die Messung des Knotenabstandes stehender Schallwellen in mit Korkfeilicht oder dergl. beschickten Glasröhren, deren Luftsäule durch das Telephon in Schwingungen versetzt wird (vgl. 1902 K. E. F. SCHMIDT, Ann. d. Ph. 7, 225).

Neuerdings ist übrigens ein Ersatz der nur sprungweise veränderlichen Stimmgabeln durch eine kontinuierliche veränderliche Vergleichsnormale (Tonvariator nach W. STERN vgl. 1904 Ph.Z. V, 693) in Anregung gebracht worden.

Durch kontinuierliche Veränderung einer angeblasenen Luftsäule nach dem in Fig. 71 wiedergegebenen Schema ist die jeweilig vorhandene Vergleichsschwingungszahl unmittelbar an der Teilscheibe ablesbar (Fig. 72), welche fest mit der Spiralscheibe der Fig. 71 verbunden ist. Die von KOHL in Chemnitz ausgeführten Apparatensätze umfassen den Bereich 100 bis 1200 Schwingungen.

Der Vergleich mit den Schwingungen von Normalstimmgabeln kann auch für nachträgliche Messungen dauernd durch graphische Registrierung erfolgen, wie dies früher (I, 2 in **272**, Fig. 341 bis 343) angegeben wurde, wenn man auf photographischem Wege die elektrischen Schwingungen mit Hilfe einer BRAUNschen Röhre aufnimmt und daneben auf derselben (bewegten) Platte die Normalstimmgabel ihre Schwingungen schreiben läßt, wie a. a. O. ersichtlich.

Für Wechselstrom mit noch höheren Wechselzahlen, bei denen die Anwendung von Stimmgabeln als Schwingungsnormalen nicht mehr angängig ist, müßte man unter Beibehaltung des photographischen Verfahrens zu rotierenden Spiegeln mit genau gemessenen, gleichförmigen Tourenzahlen — etwa durch Druckluft erzeugt — als Vergleichsnormalen für z greifen (vgl. hierzu FEDDERSEN 1861 Pogg. Ann. 113, 437), doch werden diese Messungen alsdann immer schwieriger und umständlicher und können nur in vereinzelten Fällen bei Laboratoriumsuntersuchungen zur Anwendung gelangen.

Für die Praxis sind nicht nur die zuletzt erwähnten optischen Methoden, sondern bereits die vorher erwähnten akustischen meist zu umständlich, und man verzichtet gern auf absolute Bestimmungen von z zugunsten eines empirisch geeichten, aber unmittelbar ablesbaren Wechselzeigers. Auch zwei weitere Methoden, welche VANNI (siehe ETZ 1903, 223) zur Messung der Frequenz von Wechselströmen vorgeschlagen hat — die eine mit Hilfe von LISSAJOUSschen Figuren, die durch einen leuchtenden Punkt beschrieben werden, der zuerst an dem Spiegel eines vom Wechselstrom durchflossenen Drehspulengalvanometers hierauf an einer schwingenden Stimmgabel reflektiert wird; die andere mit Hilfe des LIPPMANNschen Elektrometers — sind eher noch umständlicher als die vorerwähnten.

48. Elektromagnetische Wechselzeiger.

Die Bemühungen, direkt ablesbare Wechselzeiger zur Messung der Wechselzahl eines benutzten Wechselstromes in beliebiger Entfernung vom Erzeuger, inbesonders der Dynamo, zu konstruieren, haben sich hauptsächlich in Richtung einer Benutzung der elektromagnetischen Stromwirkungen bewegt. Hierbei war wohl mit der Umstand maßgebend, daß es für derartige Meßinstrumente erwünscht ist, den Strombedarf möglichst klein zu halten, im Gegensatz zu den Stromstärken, wie sie ein Lichtbogen (vgl. oben beim stroboskopischen Verfahren) benötigt. Dies macht vielfach schon die Rücksicht auf die Reaktionserscheinungen, wie sie sonst namentlich bei kleineren Wechselstromdynamos, also zahlreichen Laboratoriumsmessungen auftreten, notwendig. Hauptsächlich sind bisher folgende zwei Erscheinungsgruppen zur Ausbildung von Wechselzeigern herangezogen worden: die nach E. THOMSON benannten Abstoßungs- bzw. Antriebserscheinungen bei Wechselfeldern (siehe I, 2 in **275**) und die Resonanzerscheinungen mechanischer Schwingungssysteme, welche elektromagnetisch erregt werden.

Die erstgenannte Erscheinungsgruppe läßt die Ausbildung einfacher Wechselzeiger zu, die nach Art der früher (Fig. 351 in I, 2) gegebenen Skizze ausgeführt sind. Da die Scheibe S bei Konstanz der Erregerstromstärke $(\tilde{J}_l)$

einen mit z sehr nahe proportionalen Antrieb erfährt, so kann bei einer Kompensation des Antriebes durch Spannung einer Spiralfeder, also ähnlich wie bei allen Drehspuleninstrumenten, die Skaleneichung (für ein bestimmtes $\tilde{J}_l$ als stillschweigende Voraussetzung) unmittelbar in Wechselzahlen erfolgen. Obwohl derartige Instrumente von einer größeren Firma ausgebildet worden sind, so sind sie doch nicht auf dem Markte erschienen, sei es, daß die Erfüllung jener Voraussetzung zu umständlich erschien durch das Erfordernis eines besonderen Instrumentes zur Kontrolle von $\tilde{J}_l$, sowie einer Reguliervorrichtung, sei es, daß auch die Kurvenform einen zu großen Einfluß auf die Angaben des Instrumentes besaß.

Die Benutzung der mechanischen Resonanz bei Wechselzeigern hat bei folgenden zwei Ausführungen stattgefunden:

Der in Fig. 73 skizzierte Apparat (siehe STÖCKHARDT ETZ 1899, 373) besitzt eine von dem zu messenden Wechselstrom durchflossene Erreger-

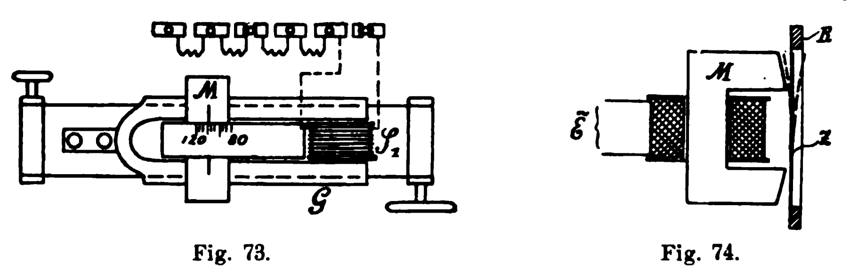


Fig. 73. Fig. 74.

spule S_1, welche die Stimmgabel G in Schwingungen versetzt. Diese Schwingungen werden ein Maximum, wenn die Eigenschwingung von G mit dem zu messenden z übereinstimmt oder ein ganzes Vielfaches m hiervon ist. Variiert wird die Eigenschwingung von G durch die verschiebbaren Gewichte M. Beim Maximum der Schwingung von G bzw. ihres Tones liefert die Ablesung einer Marke von M an der empirischen Teilung den Wert von z, wenn letzteres zwischen 80 und 120 liegt, wobei der Wert $m = 3$ beträgt. Abgesehen von der Beschränkung des Meßbereiches auf die Umgebung der bei uns üblichen Normalwechselzahl (100) muß also der ungefähre Wert von z bekannt sein, um einen groben Fehler beim Faktor m zu vermeiden; auch erfordert die genauere Einstellung einige Übung.

Praktisch bedeutungsvoller ist die Verwendung eines ganzen Satzes von Stahlfederzungen Z geworden, welche man als beweglichen Anker vor einem Wechselstromelektromagnet M schwingen läßt, dessen Erregung durch den zu messenden Wechselstrom mit Hilfe einer Spule erfolgt, die ähnlich wie eine Voltmeterspule gewickelt ist und an eine passende Spannung $\tilde{E}$ angeschlossen wird. Läßt man die Zunge Z in einem Rahmen R schwingen, durch welchen sie hindurchschlägt (Fig. 74), so kann die Bestimmung sowohl optisch wie akustisch erfolgen. Die Zungen werden mit ihrer natürlichen Schwingungszahl bezeichnet und entweder im Kreis angeordnet und vor einem Elektromagnet mit schmalen Magnetpolen vorübergedreht, bis die mit der Wechselzahl übereinstimmend schwingende Zunge erreicht und an ihrem starken Ansprechen infolge von Resonanz kenntlich wird, oder es wird eine große Zahl nebeneinander angeordneter Zungen durch einen breiten Elektromagnet gemeinschaftlich erregt und dadurch jede Einstellung von Hand vermieden, d. h. eine unmittelbare Ablesung möglich. Näheres über diese technischen (von der Firma HARTMANN & BRAUN ausgebildeten) Wechsel-

zeiger siehe in der Abteilung 5 dieses Bandes, sowie in dem ersten Aufsatz von R. Kempf-Hartmann in der ETZ 1901, 9. Bemerkt sei nur noch, daß eingehende Untersuchungen von R. Hartmann-Kempf „über den Einfluß der Amplitude auf Tonhöhe und Dekrement von Stimmgabeln und zungenförmigen Stahlfedern" (Inaug.-Diss. 1903) ergeben haben, daß die Tonhöhe eines frei abklingenden Stahlfederbandes eine gewisse Abhängigkeit von der Amplitude zeigt (Kurve A in Fig. 75). Bei Erregung durch Wechselstrom mit allmählich veränderter Wechselzahl und stufenweiser Änderung der Stärke zeigte die Schwingungsweite zwar in jedem Fall den charakteristischen Verlauf der Resonanzkurve (Kurve 1, 2, 3, 4), doch ergab die Veränderungskurve der

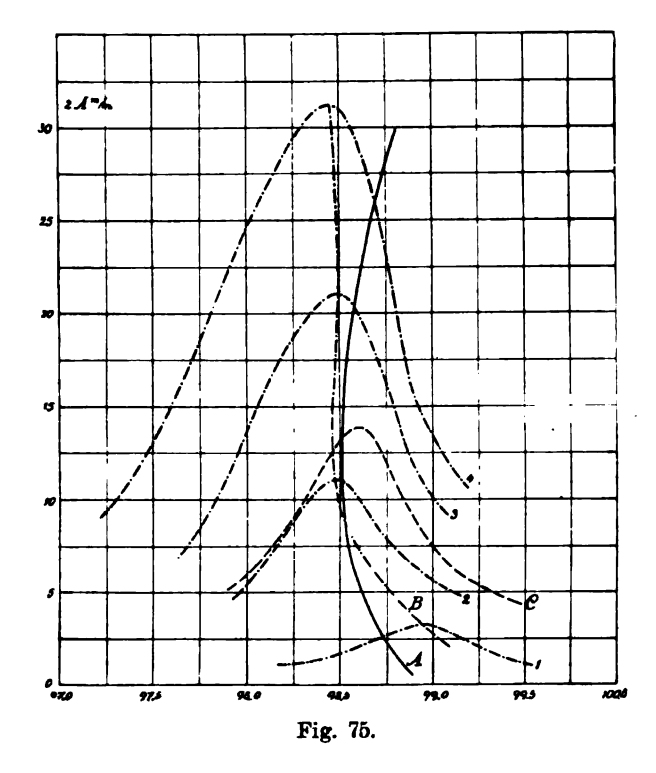


Fig. 75.

Maximalwerte von 1, 2, 3, 4 namentlich bei den niederen Werten der Schwingungsweiten eine etwas andere Abhängigkeit (Kurve B). Endlich zeigte sich, daß Wellenstrom oder intermittierender Gleichstrom sehr nahe gleiche Angaben mit Wechselstrom lieferte (Kurve C). Über weitere Einflüsse des Rahmens bzw. Kastens, des Luftwiderstandes bzw. Druckes usw. siehe a. a. O.

b) Polargeschwindigkeit von Spannung und Stromstärke.

44. **Ermittelung von ω_e aus dem Ladestrom. Reaktion auf den Generator.**

Im Gegensatz zu den vorausgegangenen Methoden zur unmittelbaren Bestimmung der Wechselzahl z, welche keine elektrischen Größen zur Messung heranziehen, erfolgt die Bestimmung von ω_e bzw. ω_i durch rein elektrische Meßmethoden unter Zuhilfenahme von Widerstands-, Selbstinduktions- und Kapazitätsnormalen. Alle diese Bestimmungsmethoden bestehen im wesentlichen in Umkehrungen von Methoden zur Bestimmung von Wechselstromkoeffizienten, wie sie in **15 ff.** behandelt wurden, insofern dort

ω_e bzw. ω_i als gegeben oder ermittelt angenommen wurde, um C bzw. L zu bestimmen, während hier für C und L gegebene Normalwerte angenommen werden zur Bestimmung von ω_e bzw. ω_i auf Grund der nämlichen, nur nach den letztgenannten Größen aufgelösten Bestimmungsgleichungen. Unter Hinweis auf die Ausführungen an jener Stelle (**15** und **32**) seien hier die verschiedenen Meßanordnungen zur Ermittelung von ω_e und ω_i kürzer erläutert und zusammengestellt.

Aus der Gleichung für den Ladestrom (vgl. **32**)

$$\tilde{J}_C = \tilde{E}_C \cdot \omega_e \cdot C$$

läßt sich

$$\omega_e = \frac{\tilde{J}_C}{\tilde{E}_C \cdot C} \cdot 10^6$$

ableiten, wenn der Ladestrom $\tilde{J}_C$ in Ampere, die Ladespannung $\tilde{E}_C$ in Volt an den Klemmen des benutzten Normalkondensators C gemessen wird (Fig. 76) und die wirksame Kapazität $\tilde{C}$ des letzteren in Mikrofarad gegeben ist. Nach den Ausführungen in **35** wäre diese Methode namentlich für hohe Werte von ω_e und die Möglichkeit direkter Messung von $\tilde{J}_C$, etwa durch ein Hitzdrahtinstrument, passend, nur darf hierbei nicht übersehen werden, daß einmal die wirksame Kapazität $\tilde{C}$ gerade bei größeren Werten von ω weniger zuverlässig bestimmbar ist und größere Abweichungen von dem nominellen Kapazitätswert C aufweisen kann, und daß ein zweites Mal eine größere Ladestromstärke $\tilde{J}_C$, welche nur für Meßzwecke erzeugt wird, leicht erhebliche Reaktionen auf die Wechselstromdynamo und ihren Ausgleich in Größe und namentlich in Phase zur Folge haben kann, die besonders bei kleineren Laboratoriumsmaschinen wohl beachtet sein wollen.

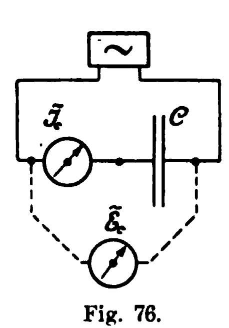


Fig. 76.

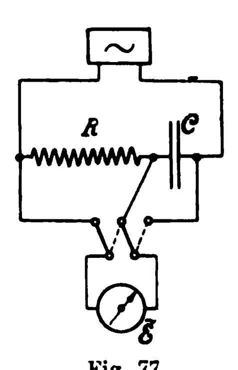


Fig. 77.

Um diese Ladestromstärken hinreichend klein zu halten, kann man die direkte Messung von $\tilde{J}_C$ aufgeben und durch eine indirekte ersetzen. In diesem Fall wird die Meßanordnung nach dem Schema der Fig. 77 abzuändern sein (**33**). Der OHMsche Widerstand R von angenähert demselben Ausgleichwiderstand in Ω wie $\frac{1}{\omega_e \cdot \tilde{C}}$ in Ω_e wird mit der Normalkapazität C, deren wirksamer Wert $\tilde{C}$ Mf betrage, in Reihe geschaltet und bei hinreichend stationären Betriebsverhältnissen mit Hilfe eines elektrostatischen Voltmeters $\tilde{E}$ die Spannung $\tilde{E}_R$ und $\tilde{E}_C$ unter Benutzung eines Fünfschalters gemessen. Alsdann folgt aus $\tilde{E}_R = \tilde{J}_C \cdot R$ und $\tilde{E}_C = \frac{\tilde{J}_C}{\omega_e \cdot \tilde{C}}$ im allgemeinen die Beziehung

$$\omega_e = \frac{\tilde{E}_R}{\tilde{E}_C} \cdot \frac{10^6}{R \cdot \tilde{C}}.$$

Man kann schließlich bei dieser Anordnung noch einen Schritt weiter gehen, indem man R variabel macht und so lange abändert, bis $\tilde{E}_R = \tilde{E}_C$ wird, wodurch alsdann völlige Unabhängigkeit von der Größe der Strom-

stärke und der Teilspannungen erzielt und die einfache Beziehung $\omega_e = \frac{10^6}{R \cdot \tilde{C}}$ erreicht wird, wenn R in Ω und $\tilde{C}$ in Mf eingesetzt wird. Nur muß natürlich auch hier darauf geachtet werden, daß die Feststellung der Gleichheit von $\tilde{E}_R$ und $\tilde{E}_C$ mit ausreichender Zuverlässigkeit erfolgen kann und die früher (**34**) angestellten Betrachtungen über die Nebenschließung von $\tilde{E}$ zu R bzw. C beachtet, sowie etwaige Einflüsse durch Reaktion von $\tilde{J}_C$ auf den Generator und auf andere Meßanordnungen entweder vermieden oder experimentell untersucht und berücksichtigt werden, etwa durch dauerndes Einschalten des Meßkreises zur Bestimmung von ω_e auch bei der Hauptmessung, ein Punkt der bei allen Hilfsmessungen, wie z. B. Ermittelung von ω, der Kurvenform usw. immer wieder zu beachten ist, um unter Umständen beträchtliche Fehler oder Verschiebungen, namentlich bei der Phase, zu vermeiden (vgl. auch **53**).

45. Bestimmung von ω_i mit Selbstinduktionsnormale.

Die Bestimmung von ω_i geschieht mit Hilfe von Selbstinduktionsnormalen L, gegebenenfalls unter Hinzunahme von reinem OHMschen Widerstand, sei es in Reihen-, sei es in Parallelschaltung mit L.

Bei direkter Messung der Stromstärke $\tilde{J}$ liefert die in **15** Fig. 30 angegebene Schaltung durch Umstellung der daselbst abgeleiteten Bestimmungsgleichung

$$\omega_i = \frac{1}{L}\sqrt{\left(\frac{\tilde{E}}{\tilde{J}}\right)^2 - R^2},$$

wenn L in Henry, R in Ω, $\tilde{E}$ in Volt und $\tilde{J}$ in Ampere eingesetzt wird.

Für diejenigen Fälle, bei denen eine indirekte Messung von $\tilde{J}$ bevorzugt wird, kann man in entsprechender Weise verfahren, wie oben bei ω_e angegeben, d. h. man schaltet vor den induktiven Widerstand mit L und r einen passenden reinen OHMschen Widerstand R, mißt die Teilspannungen $\tilde{E}_L$ und $\tilde{E}_R$, wie in **15** bei Fig. 32 angegeben, und erhält

$$\omega_i = \frac{\tilde{E}_L}{\tilde{E}_R} \cdot \frac{1}{L}\sqrt{R^2 - r^2}.$$

Macht man weiterhin R variabel und stellt auf $\tilde{E}_L = \tilde{E}_R$ ein, so folgt entsprechend den Ableitungen in **15**

$$\omega_i = \frac{1}{L}\sqrt{R^2 - r^2} \text{ bzw.} = \frac{R}{L} \text{ für } r \text{ klein gegenüber } R.$$

Zu bemerken sei noch, daß die Skaleneichung des Voltmeters zur Messung der Spannung $\tilde{E}_L = \tilde{J}\sqrt{R^2 + L^2(\pi \cdot z)^2}$ für konstante Stromstärke $\tilde{J}$ direkt nach der Wechselzahl z erfolgen kann, wenn man $\omega_i = \pi \cdot z$ setzt, ein Verfahren, das in Amerika sogar als Wechselzeiger patentiert (R. DAVENPORT) ist. Für stärker abweichende Stromkurven würde die Skalenablesung allerdings einen entsprechenden Fehler enthalten (vgl. **15**).

Auch bei Parallelschaltung eines Kreises aus praktisch reinem OHMschen Widerstand R zu einem Kreise aus praktisch rein induktivem Widerstand läßt sich ein Zeiger für die Polargeschwindigkeit ω_i bzw. Wechselzahl z konstruieren, wie das Schema eines Instruments der Gen. El. Co. (Fig. 78) erkennen läßt. Die Teilung der Stromkreise zwischen den Klemmen A und B des nach Voltmeterart angeschalteten Wechselzeigers hat in den beiden feststehenden und senkrecht zueinander angeordneten Spulen die Strom-

stärken $\tilde{J}_R = \frac{\tilde{E}}{R}$ und $\tilde{J}_L = \frac{\tilde{E}}{\omega \cdot L}$ zur Folge. Da die Spulenfelder $\tilde{N}_R$ und $\tilde{N}_L$ im gleichen Verhältnis stehen wie $\tilde{J}_R$ und $\tilde{J}_L$ so kann man setzen, wenn m das feststehende Wickelungsverhältnis beider Spulen bezeichnet,

$$\frac{\tilde{N}_R}{\tilde{N}_L} = m \cdot \frac{\tilde{J}_R}{\tilde{J}_L} = m \cdot \frac{\omega L}{R} = \omega \cdot \left(\frac{m \cdot L}{R}\right).$$

Die gegen jede Spule in ihrer Ruhelage um 45^0 versetzte bewegliche Weicheisennadel wird sich in die Richtung des aus $\tilde{N}_R$ und $\tilde{N}_L$ resultierenden

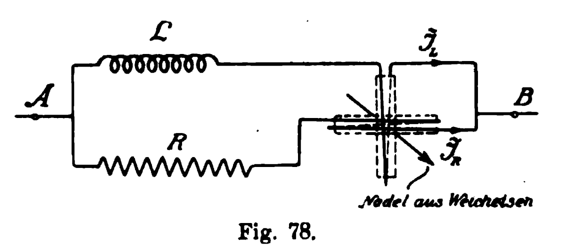


Fig. 78.

Feldes einstellen und eine Eichung der Skala bei Konstanz des Klammerausdruckes $\left(\frac{m \cdot L}{R}\right)$ nach ω bzw. nach z ermöglichen, wenn $c_i = 1$ gesetzt wird, was allerdings nach dem Früheren eine merkliche Beschränkung in der Zuverlässigkeit der Angaben bei abweichenden Kurvenformen zur Folge hat. In seiner Grundlage zeigt dieser Wechselzähler eine gewisse Verwandtschaft mit dem Phasenzeiger von H. & Br. (vgl. II, 1 in **27**).

c) Schlüpfung bei Asynchronmotoren.

46. Bestimmung mit Tourenzählern. Eine besondere Form der Touren- bzw. Wechselzahlbestimmung stellt die praktisch besonders wichtige Schlüpfungsmessung bei Asynchronmotoren dar. Da hier die Differenz zweier Touren- bzw. Wechselzahlen zu messen ist, die meist eine kleinere Größenordnung besitzt als die primären Wechselzahlen, so ergeben sich hieraus teils wesentliche Abänderungen der vorstehenden Methoden, teils völlig neue Verfahren der Ermittelung. Die verschiedenen möglichen Methoden kann man in mechanische und akustische Tourenzahlmethoden und in elektromagnetische Wechselzahlmethoden einteilen. Die Tourenzahlmethoden weiterhin in Bestimmungsverfahren mit Hilfe zweier getrennter Tourenzähler und in solche mit Hilfe von Differentialgetrieben oder akustischen Differentialbeobachtungen.

Das scheinbar einfachste und naheliegendste Verfahren der Schlüpfungsbestimmung aus der Differenz zweier Tourenzähler, von denen der eine während einer bestimmten Zeit mit dem Generator bzw. einem Synchronmotor läuft, der andere mit dem Asynchronmotor, gibt im allgemeinen nur sehr ungenaue Resultate, da alle Meßfehler in der kleinen Prozentualdifferenz, welche die Schlupftouren gegenüber den primären Touren gewöhnlich ausmachen, eine Vervielfachung erfahren, z. B. bei 4 % Schlupf auf das 25 fache. Es liegen hier also die Verhältnisse ähnlich wie bei der direkten Wirkungsgradermittelung eines Umsetzungsapparates mit kleinen Verlusten, z. B. eines Wechselstromtransformators (vgl. **106**).

Um jene unmittelbaren Fehler nun so klein zu machen, daß auch trotz jener Vergrößerung um den vielfachen Betrag in dem Endresultat die

Schlüpfung noch genügende prozentuale Zuverlässigkeit aufweist, hat SEEMANN (siehe ETZ 1899, 764) elektrisch ein- und ausrückbare Umdrehungs- und Schlüpfungszähler konstruiert, welche genau gleichzeitig betätigt werden und mehrere Minuten lang zählen. Die prozentuale Schlüpfung σ findet sich alsdann bei p_1 Generator- und p_2 Motorpolen für die abgelesenen Umdrehungszahlen u_1 und u_2 zu

$$\sigma = 100\left(\frac{u_1 p_1 - u_2 p_2}{u_1 p_1}\right) = 100\left(1 - \frac{u_2 p_2}{u_1 p_1}\right),$$

z. B. für einen 8poligen Generator mit $u_1 = 548$ und 6poligen Motor mit $u_2 = 709$

$$\sigma = 100\left(1 - \frac{709 \cdot 6}{548 \cdot 8}\right) = 2{\cdot}96\,\%.$$

47. Differentialmethoden.

Aus allgemein meßtechnischen Gründen wird man aber bei der Schlüpfung möglichst eine unmittelbare Messung der Differenz selbst anstreben, was bei den folgenden Meßmethoden auch der Fall ist.

Von den mechanischen oder Tourenzahlmethoden kommt hier zunächst die Anwendung eines Differentialgetriebes in Frage (vgl. Fig. 79), etwa in der Art, wie es bei den ARON-Zählern Verwendung findet. Dies setzt aber direkte Kuppelung des Zählrades Z mit den konischen Zahnrädern G und M voraus, deren Zähnezahlen im Verhältnis der Polzahlen stehen müssen. Am ehesten wird sich eine Messung noch durchführen lassen am Asynchronmotor M, wenn man G durch einen Synchronmotor von möglichst gleicher Polzahl mit M ersetzt, wodurch die entgegengesetzt laufenden konischen Antriebsräder gleich werden und $\sigma = 100 \frac{u_s}{u_g}$ sich ergibt.

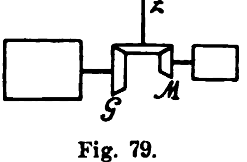


Fig. 79.

Bei kleinen Werten von σ kann man aber das Differentialgetriebe auch vermeiden und die Messung akustisch durchführen, indem man G — am besten Synchronmotor mit gleicher Polzahl wie M — mit einer Glocke und M mit einem Anschlag versieht und die mit den Differenztouren u_s übereinstimmende Zahl der Glockenschläge in einer Minute nach dem Gehör zählt. Dieses nämliche Meßprinzip läßt sich in der Ausführung natürlich noch in verschiedener Weise variieren, etwa in der Art, daß man G und M mit einer JOUBERT-Scheibe (53) versieht und für jede Differenztour den Kreis einer elektrischen Glocke schließen läßt, deren Schläge man zählt und so u_s erhält.

In anderer Weise ist bei niedrigen Werten der Schlüpfung die Zahl der optischen Schwebungen einer Glühlampe bei Untersuchungen der Phys. Techn. Reichsanstalt von KÜHNS (vgl. Z. f. J. 1903, 153) zur Messung benutzt worden. Bei dieser Methode, welche für große und kleine Motoren gleich gut verwendbar ist, wird durch einen mit der Läuferwelle starr verbundenen Kontakt bei jeder Umdrehung einmal der Stromkreis einer Glühlampe geschlossen, die an den Klemmen des Motors liegt und bei geschlossenem Kontakt von dem Wechselstrom gespeist wird, der dem Ständer zugeführt wird. Die Schlüpfung ist gleich der Anzahl der sekundlichen Schwebungen in der Helligkeit der Lampe, ist aber bei höheren Schlüpfungswerten wegen Ineinanderfließens der zu rasch aufeinander folgenden Schwebungen mit dieser Methode nicht mehr gut meßbar. Da man bei einer Glühlampe etwa bis zu 150 Helligkeitsschwankungen in der Minute zählen kann, so würde bei einem

Wechselstrom von 50 Perioden die meßbare Maximalschlüpfung etwa 2·5 % betragen. Allerdings läßt sich der Wert verdoppeln, wenn man durch Anwendung eines elektrischen Ventils, etwa von Alluminiumzellen (siehe I, 2 in **262**) dem Strom nur in einer Richtung den Durchgang gestattet. Bei noch größeren Schlüpfungen wird man eine der folgenden Methoden vorziehen und bei Benutzung des Schwebungsprinzips elektromagnetische Wirkungen zu Hilfe nehmen, etwa wie bei dem Schlüpfungsmesser von BIANCHI (siehe **50**).

Auch stroboskopisch läßt sich die Messung durchführen, etwa in der von BENISCHKE (ETZ 1899, 143) angegebenen Art. Diese Methode verwendet zur Zählung der Touren sehr kleiner Motoren, welche durch den Betrieb eines Tourenzählers eine merkliche Tourenzahländerung erfahren würden, einen eigenen Zählmotor (Gleichstrom-Nebenschlußmotor) von variabler Tourenzahl (vgl. hierzu in **41**), welcher eine Scheibe mit radialen Schlitzen trägt; eine ebensolche wird auf dem Motor mit der zu messenden Tourenzahl aufgesetzt und aus dem scheinbaren Stillstand bei gleichem Drehsinn und Gegenüberstellung beider Scheiben die Tourenzahl bestimmt.

48. **Elektromagnetische Methoden bei Motoren mit Anlaßwiderstand.**

Die elektrotechnische Praxis wird namentlich bei Werkstattmethoden den vorgenannten Tourenzahlmethoden, wo irgend angängig, die elektromagnetischen Methoden mit unmittelbarer Bestimmung der Differentialwechsel des Rotorstromes gegenüber dem Statorstrom bzw. dem Statordrehfeld, vorziehen. Die hierfür vorgeschlagenen und ausgebildeten Meßmethoden wird man vom praktischen Standpunkt aus am besten in 2 Gruppen teilen, von denen die erste nur für Asynchronmotoren mit stationärem (äußerem) Anlaßwiderstand, also gleichsam zugänglichem Rotorstrom, die zweite auch, oder richtiger in erster Linie für Asynchronmotoren ohne Anlaßwiderstand bzw. mit Kurzschlußanker in Frage kommt.

Im ersten Fall handelt es sich darum, in der vom Rotorschleifring zum Anlaß- oder Regulierwiderstand führenden Leitung die gewöhnlich äußerst geringe Wechselzahl des Rotorkreis-Wechselstromes zu bestimmen, welche der Differenz zwischen der Polargeschwindigkeit des Drehfeldes und des Rotors entspricht. Dies kann sowohl optisch wie auch akustisch erfolgen. Die Zahl der elektrischen Schwingungen im Rotorkreis, die man beim normal arbeitenden Asynchronmotor auch als Schwebungen, erzeugt durch die Differenz zwischen Drehfeld- und Rotorfeld-Geschwindigkeit auffassen kann, kann man optisch sichtbar machen, indem man den Rotorstrom entweder durch ein aperiodisches Galvanometer von kleiner Schwingungsdauer, z. B. WESTON-Amperemeter, oder auch im Nebenschluß durch ein WESTON-Nullinstrument (mit Nullpunkt in der Mitte) leitet. Bei δ Ablenkungen in der Minute nach derselben Seite geben $\frac{\delta}{30}$ die sekundlichen Rotorwechsel, oder

$$n_\delta = n_f - n_\varrho = \frac{\delta}{p}$$

die minutlichen Schlupftouren, wenn p die Zahl der Polpaare des Motors.

Noch etwas einfacher und für Werkstattmethoden in vielen Fällen, namentlich bei schwachbelasteten und leerlaufenden Asynchronmotoren, ausreichend ist die Bestimmung mit Hilfe eines Kompasses, der auf eine der Rotorleitungen gelegt wird und die Schwebungen bzw. Schlupfwechsel durch die Zahl der Abweichungen nach rechts und links angibt, wobei seine

Schwingungsweite am besten durch 2 Anschläge begrenzt wird. Zieht man eine akustische Bestimmung vor, so leitet man den Rotorstrom um eine Spulenwickelung, die an ein Telephon angeschlossen ist. Diese Bestimmung mit Hilfe des Telephons wurde zuerst von HOOR (Z. f. El. 1899, 211) angegeben, gestaltet sich aber neuerdings unter Benutzung des DIETZE-Anlegers (siehe Fig. 14 in 7) noch einfacher, da es genügt, eine Rotorleitung mit diesem Anleger zu umfassen, um an dem Telephon, das an eine der Spulen des Anlegers angeschlossen ist, die Schwebungen abhören zu können.

49. Streuungsmethode bei Kurzschlußankern.

So gut verwendbar diese Methoden bei Motoren mit nach außen geleitetem Rotorstrom, d. h. mit Anlaßwiderständen sind, so versagen sie doch in der bisher angenommenen Anordnung bei Motoren mit Kurzschlußankern. Bei diesen hat jedoch ROSENBERG (Z. f. El. 1899, 327) in der periodischen Streufeldschwankung, welche stets infolge kleiner magnetischer Unsymmetrien auftreten, eine auch außerhalb wirkende Felderscheinung gefunden, welche sich bei geeigneter Anordnung für die Messung der vorhandenen Schlupftouren benutzen läßt. Ist z. B. der Luftraum zwischen Ständer und Rotor durch eine geringe exzentrische Lagerung etwas einseitig verdrückt, wie übertrieben in Fig. 80 wiedergegeben, so wird das für zweipolige Wickelung

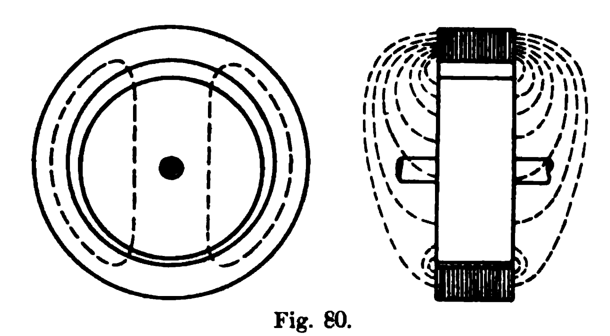


Fig. 80.

angedeutete Drehfeld die maximale Streuung stets an der Stelle des größten magnetischen Luftwiderstandes (oben) aufweisen. Da sich das resultierende Feld aber aus primärem Drehfeld und Rotorfeld zusammensetzt, so wird eine periodische Schwankung im Streufeld proportional mit den Schlupftouren auftreten. Bringt man eine Wickelung mit Eisenkern etwa in die Richtung der Streufeldkraftlinien (vgl. Fig. 80), so wird in der Wickelung eine Wechselspannung induziert, deren Periodenzahl durch jene Pulsationen des Streufeldes bedingt ist. Das Anschließen eines Telephons oder eines aperiodischen, polarisierten Galvanometers (Drehspuleninstrumentes) an jene Wickelung liefert wie oben die Schlupfwechsel, doch ist nicht zu übersehen, daß beim Telephon durch Auftreten von Obertönen, bewirkt durch mehrere übereinandergelagerte Unregelmäßigkeiten des Luftzwischenraumes, leichter Schwierigkeiten und Irrtümer entstehen als bei Benutzung eines Galvanometers mit Zählung der Abweichungen rechts und links von der Nulllage.

50. Anwendung einer Hilfstrommel mit Kontakten.

Eine Umwandlung des schon früher (43) besprochenen Frequenzmessers von HARTMANN und BRAUN zur direkten Angabe der Schlüpfungswechsel ist bei allen Motoren anwendbar unter der Voraussetzung, daß auf die Achse des Läufers eine Hilfstrommel mit verschieden langen Metallkontakten zur Erzeugung von unterbrochenem Gleichstrom aufgebracht, oder nach Art eines Tourenzählers durch zuverlässige Kuppelung (ohne mechanischen

Schlupf) mitgenommen wird. Deutet z. B. Fig. 81 die in Frage kommenden Stahlzungen eines Frequenzmessers an (vgl. hierzu **43**, sowie ETZ 1901, 14) zwischen 101 und 115 Wechseln, so sind oberhalb und unterhalb je ein verschiebbarer Wechselstromelektromagnet angeordnet. Der eine, z. B. der obere, möge nach Voltmeterart an die Primärwickelung (Ständerwickelung) angeschlossen sein und die Wechselzahl des zugeführten Primärstromes mit 110 anzeigen; der andere (untere) wird alsdann in den Gleichstromkreis eingeschaltet, der durch die oben erwähnte Hilfstrommel unterbrochen wird, etwa wie Fig. 82 andeutet. Besitzt diese Trommel z. B. 16 Metallstreifen in 4 verschiedenen Längen, so wird je nach der Stellung von B_2 zwischen 4 und 1 eine Umdrehung des Läufers 4 bis 16 Unterbrechungen liefern. Wählt man diese Stellung entsprechend der Polzahl des Ständers, d. h. so, daß auf eine Umdrehung die geschnittene Streifenzahl mit der Polzahl zusammenfällt, so entspricht die Zahl der Gleichstromimpulse der ideellen Wechselzahl des Läufers, und der von ihm gespeiste Magnet gibt diese Zahl durch das Schwingen der Stahlzungen an, in Fig. 81 etwa 103·7, d. h. die Differenz von 110 — 103·7 = 6·3 gäbe die sekundlichen Schlüpfungswechsel an. Bei kleinen Differenzen, wo eine gegenseitige Beeinflussung der Felder von M_f und M_ϱ zu erwarten steht, muß man sich dadurch helfen, daß man M_f und M_ϱ nacheinander einschaltet und abliest.

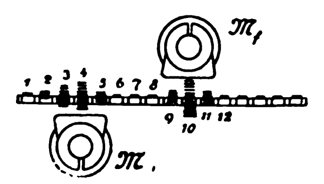


Fig. 81.

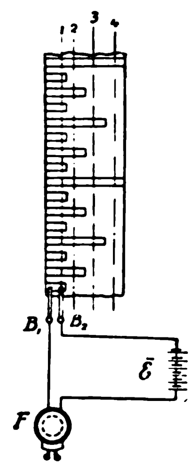


Fig. 82.

Eine ähnliche Hilfstrommel mit Kontakten, die von der Läuferwelle mitgenommen wird, benutzt der Schlüpfungsmesser von Bianchi (siehe ETZ 1903, Heft 52). Wie aus der Fig. 83 hervorgeht, werden aber hier in entsprechender Weise wie oben (**47**) bei dem Glühlampenverfahren Schwebungen erzeugt, die zur Betätigung eines Wechselstromelektromagneten E dienen und so die Zählung der Schlüpfung durch ein Zählrad Z_2 bewerkstelligen.

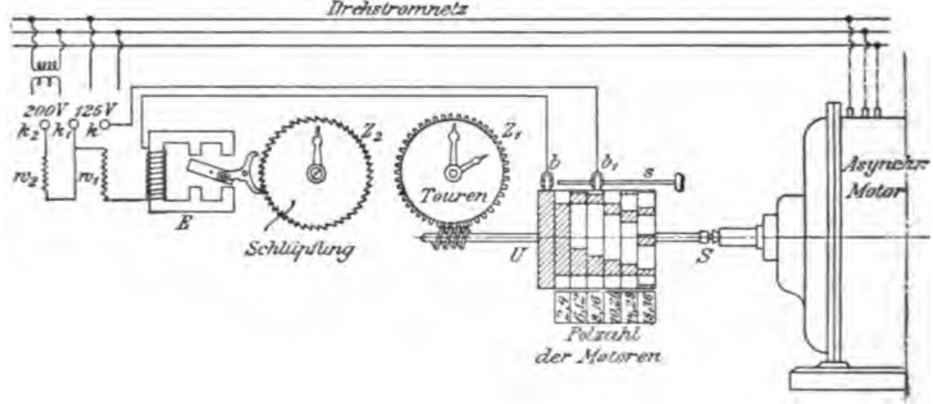


Fig. 83.

Von den Klemmen k, k_1, k_2 wird nämlich k an die eine Zuführungsleitung gelegt, k_1 oder k_2 je nach der Höhe der Motorspannung, die bei Werten

über 200 Volt herunter transformiert wird, an eine zweite Zuführungsleitung. Wären b und b_1 dauernd miteinander verbunden, so erhielte E so viel sekundliche Antriebe als den Ständerwechseln entspräche, würde aber infolge seiner Trägheit diesen nicht folgen. Der vom Läufer mitgenommene Unterbrecher U mit seinen 7 Kontaktscheiben, auf welche b_1 je nach der Motorpolzahl eingestellt wird, erteilt dem Wechselstromelektromagnet E Schwebungsimpulse, die Fig. 84 strichliert andeutet, und denen E bis zu etwa 13 % Schlüp-

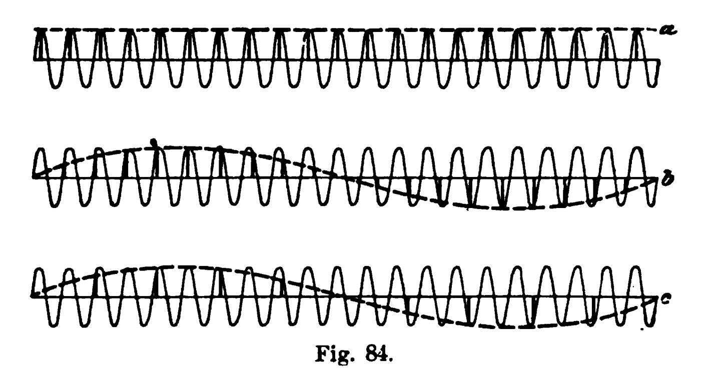


Fig. 84.

fung zu folgen vermag. Da Z_2 nur gleichzeitig mit Z_1 betätigt, d. h. weitergeschaltet wird, so fällt der Zeitfaktor heraus, weil Z_1 den Betrag $n_\varrho \cdot t$ anzeigt, die Scheibe Z_2 den Betrag $u_\varrho \cdot t$, wenn n_ϱ die Läufertourenzahl und u_ϱ die Periodenzahl des Läuferwechselstromes. Alsdann ist bei der Polpaarzahl p des Motors die prozentuale Schlüpfung

$$\sigma = 100 \cdot \frac{u_\varrho \cdot t}{u_\varrho \cdot t + \frac{p}{60} \cdot n_\varrho t} = \frac{u_\varrho}{u_\varrho + \frac{p}{60} \cdot n_\varrho}.$$

Über eine weitere Möglichkeit der Messung der Schwebungszahl mit Hilfe eines Elektrodynamometers siehe in **61.**

E. Kurvenform und Formfaktor.[1]

51. **Übersicht und Einteilung der Meßmethoden.**

Bei allen Wechselstromvorgängen ist die Bedeutung der Kurvenform von Spannung und Stromstärke von Jahr zu Jahr mehr hervorgetreten. Damit im Zusammenhange haben auch die Meßmethoden und Apparate eine immer weitere Ausbildung erfahren, bis die letzten Jahre eine ganze Anzahl von Oszillographen zeitigten, welche eine möglichst zuverlässige und bequeme Aufnahme jener Kurvenform zum Ziel haben. Bei allen diesen Meßanordnungen kann man eine Unterscheidung nach zwei Richtungen treffen: Einmal nach der Höhe der sekundlichen Wechselzahl, ein zweites Mal nach der Art der Gewinnung der Kurve, und zwar je nachdem die Kurve p u n k t w e i s e gewonnen wird, unter Voraussetzung völliger Konstanz der Kurvenform und

1) Nach Abschluß dieses Abschnittes ist eine Bearbeitung dieses Sondergebietes von E. Orlich (Aufnahme und Analyse von Wechselstromkurven. 1906. Vieweg & Sohn) erschienen, die eine wertvolle vollständige Zusammenstellung aller einschlägigen Verfahren mit Einschluß der harmonischen Analysatoren darstellt. Als Ergänzung der folgenden Ausführungen sei daher auf diese Einzeldarstellung verwiesen.

Benutzung von Ordinatenwerten, die verschiedenen, beliebig weit voneinander abstehenden Halbwellen angehören, oder ob sie zusammenhängend, meist durch photographische Aufnahme, ermittelt wird, wobei die Aufnahme nur einer oder die Übereinanderlegung mehrerer Wellen allein von der Empfindlichkeit der photographischen Platte abhängt und nach Belieben gewählt werden kann. Während man jene gewöhnlich als Kontaktmachervorrichtungen, oder auch bei weiterer Ausbildung als Kurvenindikatoren bzw. Ondographen bezeichnet, belegt man diese gewöhnlich mit dem Namen Oszillographen.

Was den Einfluß der Wechselzahl auf die Wahl der Aufnahmsmethode betrifft, so kommen die Kontaktmachermethoden in erster Linie und praktisch fast allein für niedere Wechselzahlen in Frage, welche nicht sehr weit über die bei technischem Wechselstrom üblichen hinausgehen. Bei den Oszillographen hängt die Höhe der sekundlichen Periodenzahl, welche noch eine zuverlässige Aufnahme gestattet, von der Eigenschwingung des zur Aufzeichnung benutzten Schwingungssystems ab. Je kleiner also das mechanische Trägheitsmoment T des Lichtzeigers bzw. seines vermittelnden Gliedes, etwa einer Spiegelvorrichtung ist und je größer das Direktionsmoment D bei letzterer, um so kleiner ist die Eigenschwingung τ des Systems nach der Gleichung $\tau = \pi \sqrt{\frac{T}{D}}$ (vgl. hierzu I, 2 in **194**) und um so später, d. h. bei um so höherer elektrischer Wechselzahl z tritt jene erst ins Spiel und macht zunächst die Feinheiten des Kurvenverlaufes unsicher und weiterhin jede brauchbare Kurvenaufnahme überhaupt illusorisch (siehe hierzu auch in **168**).

Für periodische Ausgleichvorgänge mit sehr hohen Wechselzahlen, wie sie in der Elektrophysik bei den elektrischen Schwingungen vielfach auftreten, versagen daher aus diesem Grunde auch alle Oszillographen mit mechanischen Schwingungssystemen mehr oder weniger rasch, die bei technischen Wechselzahlen noch sehr gut brauchbar sein können. In dem Bestreben, auch diese Schwingungsvorgänge in ihrem Kurvenverlauf annähernd festlegen zu können, hat die Physik nach Oszillographen, bzw. elektromagnetisch (durch Feldwirkungen) beeinflußbaren Lichtzeigern mit möglichst verschwindender Masse gesucht. Solche fanden sich in den Kathodenstrahlen.

53. Kathoderstrahl- und Glimmlicht-Oszillographen.

Die Art, wie solche Stromkurven mit Hilfe der BRAUNschen Röhre aufgenommen werden können, wurde bereits früher (I, 2 in **272**) behandelt, auch wurden daselbst in Fig. 343 einige derartige Aufnahmen wiedergegeben. Ist die Trägheit hier auch so klein, daß die Eigenschwingung des Lichtzeigersystems jedenfalls nicht fälschend ins Spiel tritt, so ist hier die Grenze durch die Empfindlichkeit der photographischen Platte gezogen, wie Fig. 343 erkennen läßt. Auch verhindert die verhältnismäßig große Breite und Verwaschenheit des Kathodenstrahles eine weitgehende Herausarbeitung der Einzelheiten im Verlauf der Stromkurve, wenn auch für viele Zwecke die erhaltenen Resultate wertvolle Aufschlüsse gestatten.

Neben diesem Verfahren mit Benutzung der BRAUNschen Röhre ist in letzter Zeit von GEHRCKE (siehe Z. f. J. 1905, Heft 2) eine Eigentümlichkeit des „negativen Glimmlichtes" (vgl. hierzu auch I, 2 in **247**) zur Ausbildung eines Glimmlichtoszillographen benutzt worden, mit dem der Stromverlauf hochgespannter elektrischer Wechselströme photographisch festgelegt werden kann. Schließt man an die 10 cm langen Nickeldrahtelektroden A und B des in

Fig. 85 dargestellten Rohres, das mit verdünntem Stickstoff gefüllt ist, eine hinreichend hohe Wechselspannung (mehrere Tausend Volt, die gegebenenfalls durch Transformation beschafft werden) an, so bedingt die das Rohr durchfließende Wechselstromstärke, welche der Spannung im wesentlichen konform ist, daß nach einer von HEHL (Ph. Z. 1902, 547) gefundenen Gesetzmäßigkeit die mit negativem Glimmlicht bedeckte Elektrodenoberfläche — bei Fig. 85a punktiert angedeutet — in jedem Moment der Stromstärke direkt proportional ist. Bei drahtförmigen Elektroden, deren Enden in der Projektion zusammenfallen, wird also die Glimmlicht**länge** mit $\tilde{J}$ direkt pro-

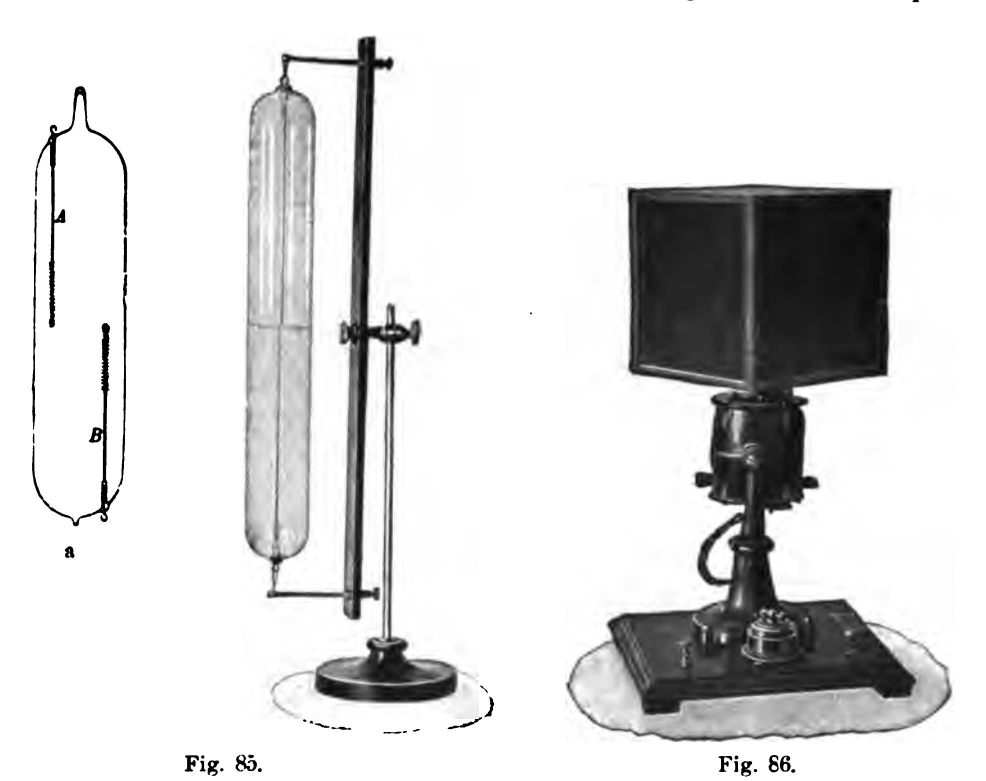


Fig. 85. Fig. 86.

portional variieren und zwar beiderseits von jener Stoßfuge als Nullniveau. Wird dieses Glimmlicht im rotierenden Spiegel, am besten ein Würfelspiegel, sei es mit Gleichstrommotorantrieb (Fig. 86), sei es mit Synchronmotorantrieb (Fig. 87) — beide Ausführungen nach RUHMER — betrachtet, so liefert die Umgrenzungslinie der hellen Spiegelbilder des Glimmlichts direkt die Stromkurve des Wechselstromes. Wegen der starken photographischen (aktinischen) Wirkung des Glimmlichtes ist trotz seiner schwachen Leuchtwirkung die Möglichkeit vorhanden, die Stromkurven mit **lichtstarken** Objektiven auch objektiv aufzunehmen (Fig. 88). Das hierbei benutzte kinematographische Verfahren mit fallender Platte P (Abstand L_1P etwa 45 cm und Fallhöhe 20 cm, also Abszissenteilung durch 1 cm für etwa 0·005 Sekunden gegeben) entspricht dem früher (I, 2 Fig. 341 bis 343) angeführten Verfahren. Auch hier könnte gleichzeitig eine Bestimmung der sekundlichen Periodenzahl durch die nebenan erfolgende Aufzeichnung der Schwingungen einer Normalstimmgabel erfolgen, oder auch durch Ermittelung

der Winkelgeschwindigkeit bei den rotierenden Spiegeln. Solche Aufnahmen nach Gehrcke-Ruhmer, zeigt Fig. 89 in Originalgröße. Weiteres über gewisse Eigentümlichkeiten dieses Oszillographen und sonstige Bedingungen für brauchbare Aufnahmen siehe a. a. O.

Auch bei diesem Verfahren darf man an die Gewinnung von zuverlässigen Einzelheiten in der Kurvenform keine zu hohen Anforderungen



Fig. 87.

stellen, so wertvoll es für einzelne Zwecke, namentlich Demonstrationsversuche, sein mag, da es auch abklingende Schwingungen, wie z. B. die bei einer Kondensatorentladung (Fig. 90), zu beobachten gestattet. Für genauere Aufnahmen von Kurvenformen der Technik wird man daher im allgemeinen eine der folgenden Methoden vorziehen.

58. Kontaktmacherverfahren.

Das älteste technische Verfahren bildet das Kontaktmacherverfahren, wie es zuerst von Joubert mit Hilfe der nach ihm benannten Scheibe zur Aus-

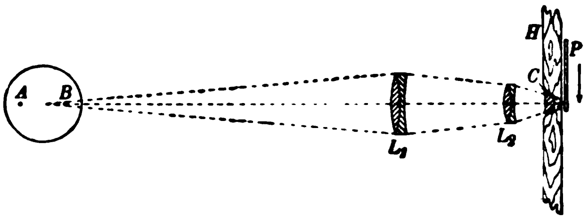


Fig. 88.

führung gelangte. Die Grundlage dieser auch heute noch für zahlreiche Zwecke wichtigsten Methode bildet die punktweise Festlegung einer Spannungskurve, wobei jeder der einzelnen hierzu erforderlichen Momentanwerte e dadurch gewonnen wird, daß aus allen aufeinanderfolgenden Spannungswellen er allein in steter Wiederkehr und gleichem Betrage mit dem Meßinstrument — meist polarisiertes Galvanometer, z. B. Drehspulenspiegelinstrument — in Verbindung gebracht und durch die mit e proportionale Galvanometerstromstärke i bzw. Ausschlagsgröße α gemessen wird.



Fig. 89 a. Hammerunterbrecher (langsamer Gang).

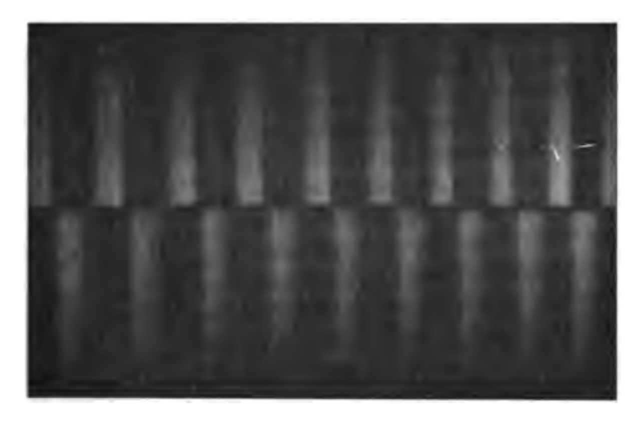


Fig. 89 b. Hammerunterbrecher (schneller Gang).



Fig. 89 c. Quecksilberstrahlunterbrecher.



Fig. 89 d. Lichtbogenunterbrecher.



Fig. 89 e. Flüssigkeitsunterbrecher (Gleichstrom).

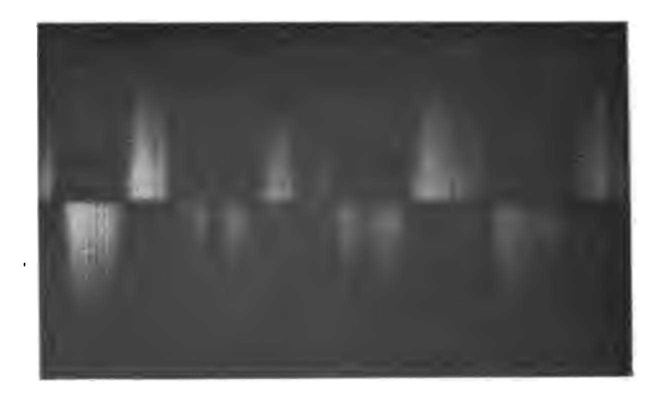


Fig. 89 f. Flüssigkeitsunterbrecher (Wechselstrom).



Fig. 89 g. Wechselstrom.

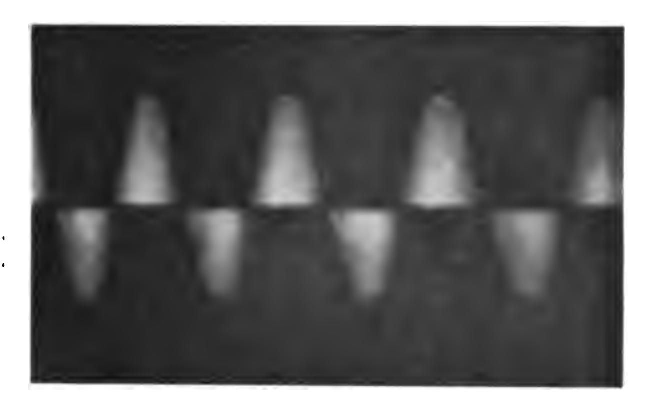


Fig. 89 h. Wechselstrom mit Aluminiumzelle.



Fig. 89 i. Wechselstrom. Sekundäre Spule mit Kapazität belastet.

416498

Nach der Entwickelung, welche die Ausführung der Kontaktscheiben genommen hat, kann man die Kontaktmacher in folgender Weise unterscheiden: ältere Ausführungen, bei denen Schneidenkontakte von sehr kurzer Zeitdauer die Heraushebung der jeweils zur Messung gelangenden Momentanspannung e bewerkstelligen, wobei dieser in Richtung und Größe stets wiederkehrende Spannungswert den Galvanometerausschlag ohne, oder auch mit Zuhilfenahme eines Kondensators (zur Vergrößerung der Stetigkeit des Ausschlages) erzeugt; neuere Ausführungen, bei denen die kurzen und leichter zu Störungen Veranlassung gebenden Schneidenkontakte vermieden und durch längere Segmentkontakte ersetzt sind, deren



Fig. 90.

Ablaufkante für den zu messenden Momentanwert dadurch wirksam gemacht wird, daß die Momentanspannung e, welche im Moment der Trennung von Segment und Schleifbürste vorhanden ist, die Elektrizitätsmenge (Ladung)

$$q = e \cdot C$$

bedingt, wobei q in einem Kondensator von konstanter Kapazität C kurze Zeit — während des Gleitens der Bürste über die Isolierschicht zwischen dem Lade- und Entladesegment — aufrecht erhalten bleibt, um bei Berührung des Entladesegments durch ein Galvanometer entladen und gemessen zu werden (**31**). In beiden Fällen wird durch die gegenseitige Verschiebung zwischen Segment und Bürste, von denen das eine Glied mit einer Gradteilung, das andere mit einer an ihr entlang gleitenden Marke fest verbunden ist, die Möglichkeit gegeben, die ausreichende Zahl von Abszissenwerten innerhalb einer Periode auszuwählen und festzulegen. Werden zu diesen Abschnitten, als Teilwerten einer zeitlichen bzw. räumlichen Periode, die beobachteten und (falls nötig) reduzierten Ausschläge entweder direkt, oder in Volt umgerechnet aufgetragen, so erhält man die Kurve der Spannung in rechtwinkligen Koordinaten. Will man die Form einer Stromkurve festlegen, so wird die zu messende Stromstärke durch einen reinen Ohmschen Widerstand (ohne Nebenkoeffizienten) von passender Größe geleitet und die mit der Stromstärke alsdann notwendig konforme Spannung an seinen Enden in gleicher Weise gemessen.

Von den älteren Ausführungen mit Schneidenkontakt sei als Beispiel nur ein von Ryan angegebener und von Queen (Philadelphia) auf den Markt gebrachter Apparat in Fig. 91 angeführt, der leicht transportabel ist. Seine

Einschaltung in die obenerwähnte Meßanordnung zur Ermittelung der Klemmenspannungskurve eines Wechselstromgenerators zeigt Fig. 92. Aus beiden geht hervor, daß die bei jeder Umdrehung aus der Periode herausgehobene Momentanspannung e dadurch mit dem Kondensator C bzw. dem Galvanometer G in Verbindung gebracht wird, daß die Schneide G, welche mit Metallring A und Schleifbürste D leitend verbunden, hingegen von Metall-

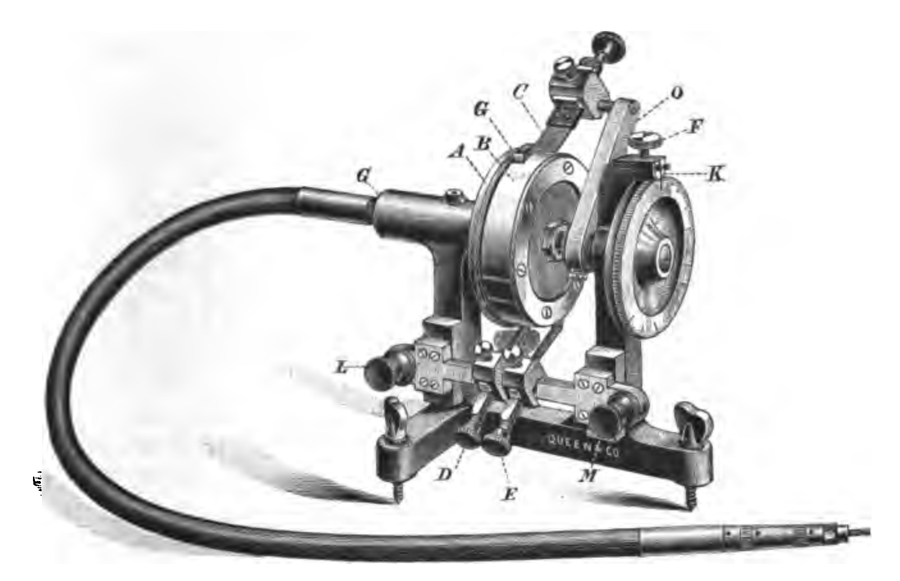


Fig. 91.

ring B mit Schleifbürste E sehr sorgfältig isoliert ist, durch die Bürste C im Vorüberschleifen mit B und damit mit E momentan verbunden wird. Die mit der Kreisteilung K fest verbundene Bürste C ist verschiebbar und durchläuft bei einer Maschine von p Polpaaren eine elektrische Periode bei einer Verstellung um $\frac{360}{p}$ Winkelgrade. Die flexible Welle des Kontaktmachers C.M. gestattet zwar eine bequeme Verbindung mit dem Generator W. G., der auch durch

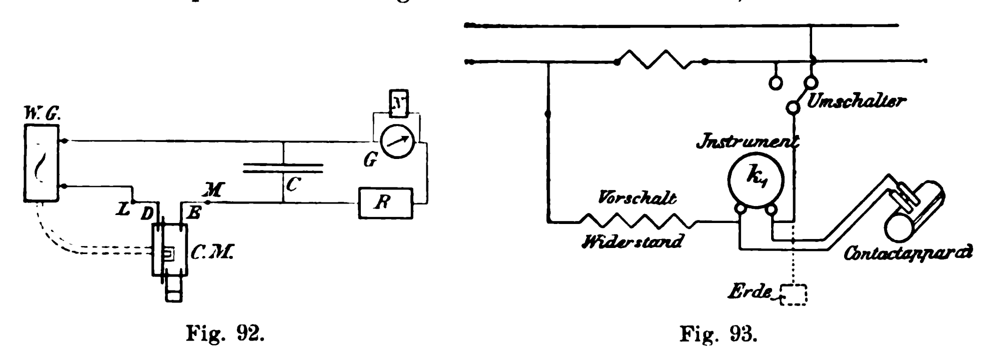


Fig. 92. Fig. 93.

einen Synchronmotor ersetzt werden könnte, enthält aber gleichzeitig eine mit der Länge wachsende Unsicherheit bei verschieden starker Drillung der Welle, die namentlich bei Ermittelung der Phasenverschiebung zwischen nacheinander aufgenommener Spannungs- und Stromwelle erheblich ins Gewicht fallen kann. Neuerdings zieht man daher entweder direkte Kuppelung

vor, oder, wo dies Schwierigkeiten macht, die Anwendung so kurzer flexibler Verbindungen — nicht über 10 cm — daß keine erheblichen Verdrillungsfehler entstehen können. Da weiterhin auch das Arbeiten mit der Schneide etwas subtil ist und namentlich bei längerem Gebrauch leicht zu Störungen in der Sicherheit und Gleichförmigkeit des Kontaktes Veranlassung gibt, so sind mehrfach Abänderungen in Vorschlag gebracht worden. Zunächst wäre eine Art Umkehrung der JOUBERTscheibe zu erwähnen (siehe W. KÜBLER ETZ 1897, 652). Das Meßinstrument (k_1 in Fig. 93) ist hierbei gewöhnlich

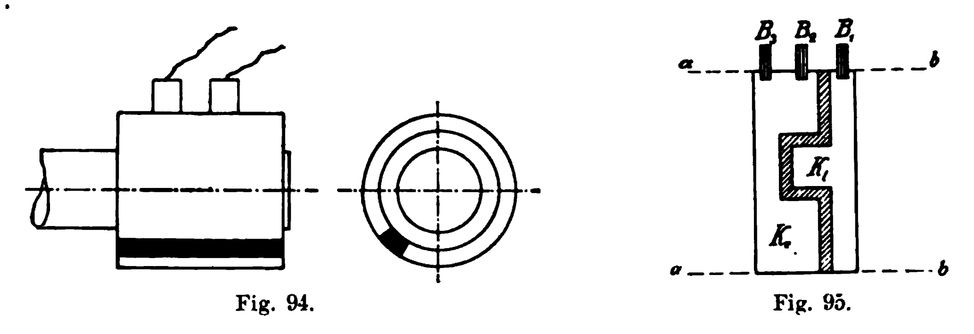


Fig. 94. Fig. 95.

durch zwei Bürsten kurzgeschlossen, die auf einem Metallzylinder (Fig. 94) schleifen, der synchron angetrieben wird. Ein schmaler Isolierstreifen in

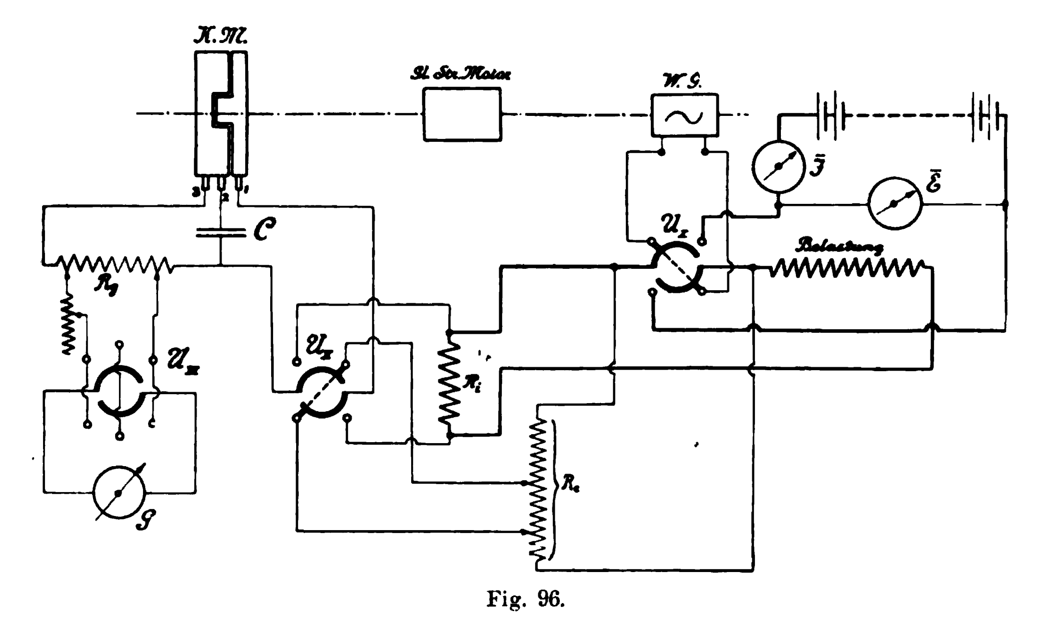


Fig. 96.

demselben hebt den Kurzschluß auf und bedingt die Anzeige des Augenblickswertes durch k_1.

Die oben erwähnten neueren Ausführungen mit segmentförmigen Kontakten, besitzen einen Ladekontakt K_l und einen Entladekontakt K_e, welche bei einem Umlauf nacheinander von der Schleifbürste B_2 überstrichen werden und durch gut isolierende Zwischenlagen — in Fig. 95, welche den von B überstrichenen Umfang nach Aufschneiden in der Radialebene $a\,b$ abgerollt darstellt, durch Schraffierung kenntlich gemacht — voneinander getrennt

sind. Gewöhnlich wählt man hierbei die Länge des Ladekontaktes zu etwa $^1/_3$, diejenige des Entladekontaktes gegen $^2/_3$ des Umfanges.

Die Einordnung eines solchen Kontaktmachers in eine vollständige Meßanordnung, welche neben der Ermittelung der zusammengehörigen Spannungs- und Stromkurven auch die unmittelbar anschließende Eichung der Galvanometerausschläge in Volt bzw. Amp. mit Hilfe einer Gleichstromquelle (Akk.) ermöglicht, zeigt das Schema der Fig. 96. Der zum Antrieb des Wechselstromgenerators W. G. benutzte Gleichstrommotor ist auf der anderen Seite mit dem Kontaktmacher K. M. möglichst zwangläufig gekuppelt. Durch den Umschalter U_I kann W. G. (in der gezeichneten Stellung) auf die gewünschte Belastung geschaltet werden, die in Reihe mit dem reinen Ohmschen Widerstand R_i zur Ermittelung der Stromwellenform liegt. In der gezeichneten Stellung von U_{II} wird aber nicht diese, sondern die Spannungswelle (Klemmenspannungskurve von W. G.) aufgenommen, welche sich durch den möglichst groß gewählten reinen Ohmschen Widerstand R_e (am besten Lamettawiderstand von über 10000 Ω) ausgleicht. Als Kondensator C, welcher bei leitender Verbindung zwischen Bürste 1 und 2 geladen, zwischen Bürste 2 und 3 durch das Galvanometer G entladen wird, nimmt man am besten einen Glimmerkondensator zwischen 0·01 und 0·1 Mf, wobei günstige Schwingungsbedingungen von G, sowie eine passende Empfindlichkeit, einmal durch geeignete Wahl der veränderlichen Galvanometerkreiswiderstände R_g, ein zweites Mal durch geeignete Abzweigung von R_e bzw. Wahl von R_i erreichbar sind. Nachdem dies festliegt, kann für die gewählten Widerstandskombinationen sofort die Eichung der Ausschläge in Volt bzw. Ampere erfolgen, wenn man den Umschalter U_I auf die Batterie umschaltet, deren Spannung $\overline{E}$ in Volt und Stromstärke $\overline{J}$ in Amp. zu den nun auftretenden Galvanometerausschlägen $\bar{a}_e$ und $\bar{a}_i$ bestimmt wird.

Zu beachten ist bei allen diesen Kontaktmacherschaltungen, ebenso wie bei den folgenden Oszillographenverfahren, daß auf die Reaktion der Meßschaltungsbelastung Rücksicht genommen werden muß. Dies gilt besonders für kleinere Maschinen, wie sie in Laboratorien untersucht werden, bei Aufstellung der EMK-Kurve. Ist hier nicht R_e ausreichend groß und C ausreichend klein gewählt, so kann die Reaktion, namentlich die des voreilenden Ladestromes von C sehr merkliche Fehler zur Folge haben, namentlich was die Phase der höheren Harmonischen anlangt. Um diesen Einfluß empirisch zu untersuchen und sich gegen grobe Fehler in der letztgenannten Richtung zu schützen, müssen nötigenfalls Kontrollbeobachtungen unter Variation von R_e und C ausgeführt werden. Diesem Punkt der Reaktion der Meßschaltungsbelastung auf die zu messende Größe selbst (**44**) scheint vielfach noch zu wenig Beachtung geschenkt zu werden, besonders in dem Fall der Bestimmung der vermeintlichen EMK-Kurve kleinerer Wechselstromgeneratoren.

Als mögliche Fehlerquelle ist weiterhin zu beachten, daß die plötzliche Ladung und Entladung der Kapazität die elektrischen Eigenschwingungen jedes Kapazität und Selbstinduktion enthaltenden Schwingungskreises anregt (vgl. hierzu I, 2 in **197**), wodurch eine Abweichung der erhaltenen Meßwerte von der Kurvenform, wie sie ohne jenen Meß- bzw. Schwingungskreis vorliegt, eintreten kann.

54. Kurvenindikator von R. Franke.

An diese Kontaktmacherverfahren mit punktweiser Beobachtung der Momentanspannungswerte und nachfolgender Eintragung derselben in ein Koordinatensystem (vgl. Fig. 34 und 117) schließen sich als weitere Entwicke-

lung dieses Verfahrens die Apparate an, welche eine halb oder ganz automatische Aufzeichnung der in gleicher Weise erhaltenen Kurven auf Indikatortrommeln bewerkstelligen. Als solche Apparate seien hier, um die Grundlage des Vorgehens zu zeigen, zwei marktgängige Ausführungen, der

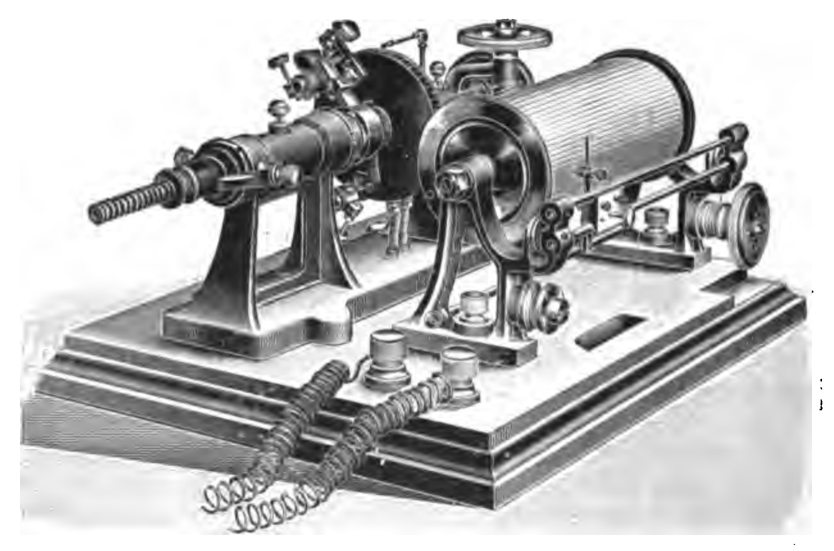


Fig. 97.

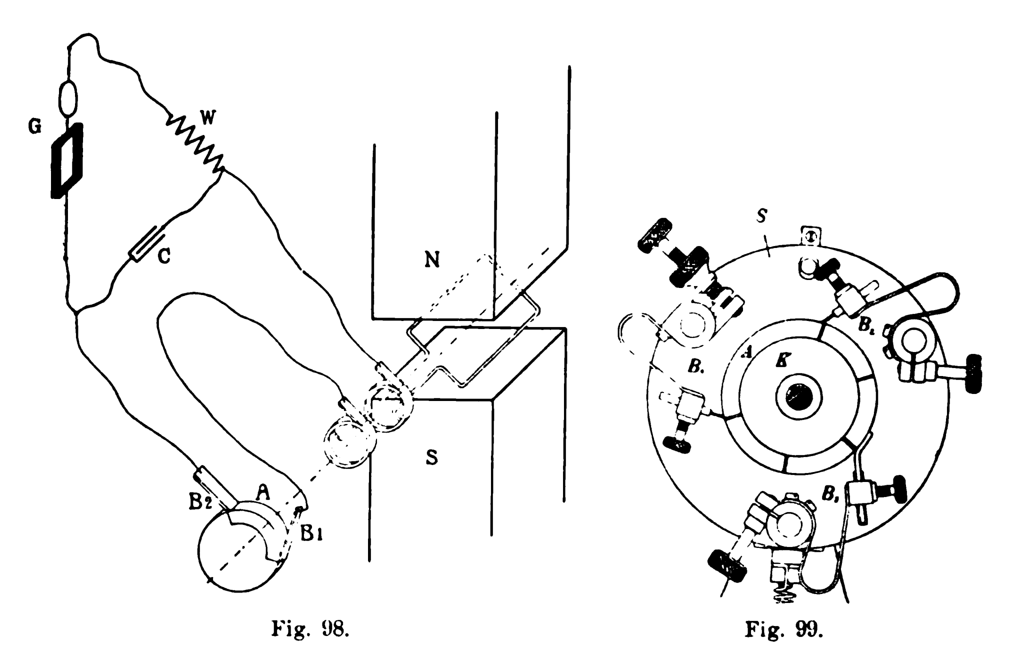


Fig. 98. Fig. 99.

„Kurvenindikator“ von R. FRANKE und der „Ondograph Hospitalier“ in ihrer Einrichtung etwas näher beschrieben.

Der Kurvenindikator nach FRANKE (siehe ETZ 1899 Heft 46 oder Z. f. J. 1901, 11) zur Aufzeichnung periodischer elektromagnetischer Vorgänge, der in seiner Gesamtansicht in Fig. 97 wiedergegeben ist, erlaubt entweder (ohne

Benutzung der Registriertrommel) die Momentanwerte der Kurven punktweise aus Galvanometerausschlägen zu bestimmen, ähnlich wie bei den vorausgehenden Verfahren, oder (durch Kuppelung der Registriertrommel mit dem Bürstenhalter des Kontaktmachers) den auf die Trommel objektiv entworfenen Lichtpunkt bei allmählicher Verschiebung des Bürstenhalters „halbautomatisch“, d. h. durch Nachfahren mit einer Schreibvorrichtung aufzuzeichnen. Der

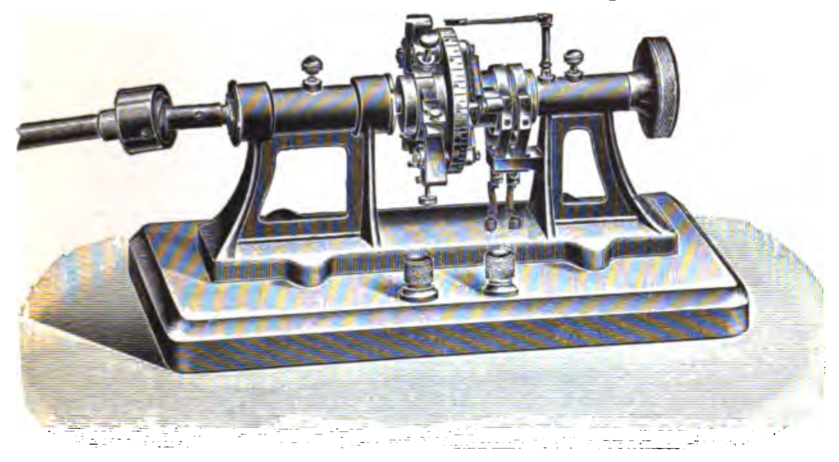


Fig. 100.

Kontakt wird hierbei, wie Fig. 98 erkennen läßt, in etwas anderer Art bewerkstelligt, als bei den vorstehend erwähnten Kontaktmachern (vgl. Fig. 96). Hier wird nämlich nur 1 Segmentkontakt A mit zwei gegeneinander etwas verstellbaren Bürsten B_1 und B_2 benutzt, die aber an demselben Bürsten-



Fig. 101.

halter (Fig. 99) sitzen und gemeinschaftlich verschoben werden, wobei die Größe der Verschiebung an einer mit dem Bürstenhalter fest verbundenen Teilscheibe gegenüber einer feststehenden Schneide (vgl. Fig. 100) gemessen wird. Um diese Verschiebung in Graden direkt als Abszissenteilung für die Periode benutzen zu können, wird der Kurvenindikator mit einer mit der Periodenzahl übereinstimmenden Umdrehungszahl betrieben, was für mehr als 2 polige Maschinen (4 bis 20 polige) entweder durch Rädervorgelege (Fig. 101), oder mit Hilfe eines 2 poligen Synchronmotors bewerkstelligt

wird. Der Umfang des Segmentes A (Fig. 99) beträgt etwa 120°, während die Bürsten B_1 und B_2 auf einen Bogenabstand von etwa 119° eingestellt werden, so daß die Kontaktlänge zur Ladung des Kondensators C in Fig. 98 etwa 1° beträgt. Die 4 kleineren Kollektorsegmente von etwa 60° (Fig. 99) haben nur den Zweck, den Bürsten eine gleichartige Schleiffläche darzubieten und ein Springen bzw. Schwingen der Kontaktbürsten hintanzuhalten und die Zuverlässigkeit der Einzelkontakte zu sichern, wozu auch die Bürste B_3

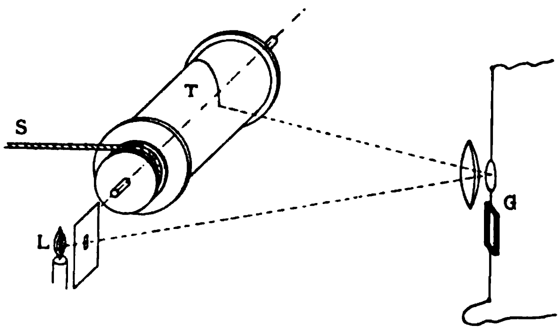


Fig. 102.

dient, die durch ein mit Petroleum angefeuchtetes Filzstückchen eine dauernd gute Leitung an den Übergangsstellen von B_1 und B_2 unterstützen soll.

Da der Kondensator C so viel Ladungen erhält, als der zu untersuchende Wechselstrom sekundliche Periodenzahlen besitzt, so wird die Entladung

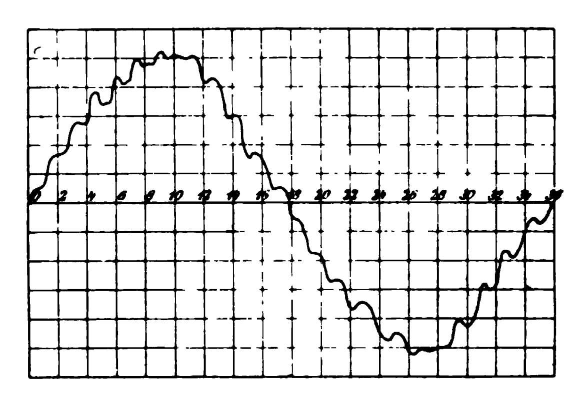


Fig. 103.

durch G (Fig. 98) bei hinreichend großem Vorschaltwiderstand W (wenigstens 10000 Ω) in Form eines angenähert konstanten Gleichstromes erfolgen und gestattet außerdem bei Verwendung eines hinreichend empfindlichen Galvanometers, z. B. Spiegel-Drehspuleninstrumentes, noch sehr kleine Spannungswerte, sowie auch die hohen Werte bei unmerklicher Reaktion der Meßvorrichtung auf die zu untersuchende Kurve zur Messung zu bringen. Zur Aufnahme von Stromkurven neben den Spannungskurven wird man eine Meßschaltung, wie in Fig. 96 angegeben, vorsehen. Die „halbautomatische" Aufzeichnung auf die Registriertrommel T (Fig. 102), welche mittels Schnurlauf S zusammen mit dem Bürstenhalter gedreht wird, erfolgt mit Hilfe des mittels Linse auf T entworfenen Lichtpunktes, doch erfordert die fehlerfreie Aufzeichnung der Lichtpunktkurve bei zackenreichen Kurven, wie sie etwa

Fig. 103 für die Spannung eines rotierenden Umformers darstellt, eine nicht geringe Übung.

55. Ondograph Hospitalier.

Der Schritt von der „halbautomatischen“ zur selbsttätigen Aufzeichnung der Kurven ist bei dem „Ondograph Hospitalier“ erfolgt, dessen Grundlage

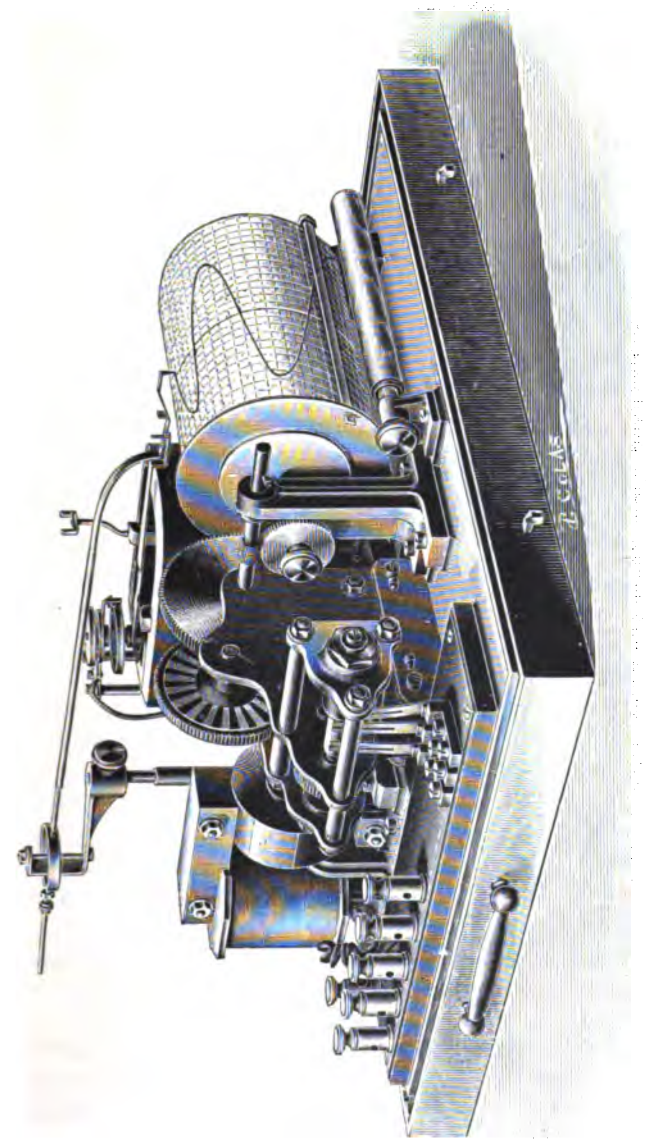


Fig. 104.

auf einer Vereinigung der JOUBERTschen Punktiermethode mit einer elektrisch betätigten Zeichenvorrichtung beruht. Wie die Ansicht des Apparates in Fig. 104, sowie sein Schaltungsschema in Fig. 105 erkennen läßt, wird der ganze Apparat durch den 2poligen Synchronmotor A angetrieben, so zwar, daß mit Hilfe der Räderübersetzung B die Kontaktmacherachse D 999 Um-

drehungen auf 1000 Umdrehungen von A macht, während die Registriertrommel C in der gleichen Zeit nur langsam $^2/_3$ einer Umdrehung vollführt. Die Kontaktmachervorrichtung wirkt nach Art der bei Fig. 95 beschriebenen mit aufeinanderfolgender Ladung und Entladung des Kondensators CC' durch die zu messende Spannung zwischen U und U'. Die 999 Entladungen des Kondensators zur Aufzeichnung einer Welle mit stetig wechselnden Werten der Momentanspannung betätigen das Drehspuleninstrument E, das den Schreibzeiger F auf der Schreibtrommel C führt. Inwieweit bei diesem

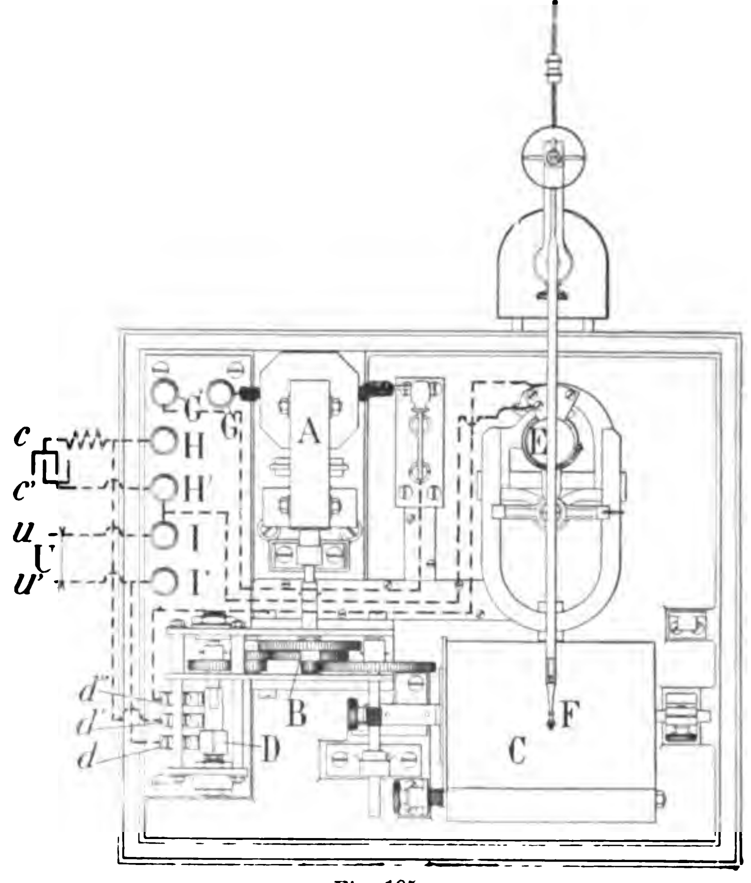


Fig. 105.

in seiner Idee sehr vollkommenen Apparat allerdings die Kapazität C, die zur sicheren Betätigung von E voraussichtlich ziemlich groß gewählt werden muß, bei ihren häufigen Ladungen mit zwischendurch erfolgenden vollständigen Entladungen, eine Reaktion auf die zu messende Kurvenform ausübt, müßte durch besondere Untersuchungen festgestellt werden (vgl. hierzu in **53**). Jedenfalls ist dies bei dem vorliegenden Apparat derjenige Punkt, welcher zur Vermeidung grober Selbsttäuschungen die meiste Beachtung und Vorsicht verlangen dürfte.

56. Oszillograph Blondel

In neuerer Zeit sind die bisher erwähnten Verfahren, welche sich alle auf der punktweisen Aufnahme aus vielen aufeinanderfolgenden Perioden nach Joubert aufbauen, in der Technik stark durch die Ausbildung der Oszillographen verdrängt worden, welche als Grundlage die zuerst von

BLONDEL (1893, der Académie des sciences am 6. März vorgelegt) angegebene Benutzung einer Galvanometervorrichtung von äußerst kleiner Eigenschwingung zur Aufzeichnung ganzer Periodenzüge besitzen.

BLONDEL hat für Oszillographenzwecke — die Bezeichnung oscillographe rührt auch von ihm her — zwei Apparatentypen ausgebildet, die man als Weicheisentype und Drehschleifentype unterscheiden könnte. Bei der Weicheisentype (vgl. Fig. 106) wird ein sehr dünnes, straff gespanntes Eisenband, das einen sehr kleinen Spiegel trägt, einerseits durch einen lamellierten Dauermagneten P magnetisiert, andererseits dem senkrecht hierzu verlaufenden Wechselfeld ausgesetzt, das von der Spule B mit dem zu untersuchenden Wechselstrom $\tilde{J}$ erzeugt wird. Diese Type, welche mehr für industrielle Zwecke und für stärkere Ströme (über 0·1 Ampere) gedacht ist, hat zwar den Nachteil durch die Spulen eine merkliche Selbstinduktion in den Stromkreis zu bringen, erlaubt aber auf der anderen Seite das Eisenband so straff zu spannen, daß die Eigenschwingungsdauer des Systems

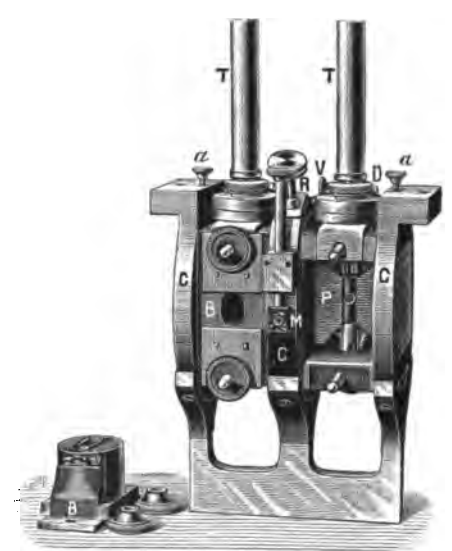


Fig. 106.

(vgl. hierzu **51**), wenn als Medium nicht Luft sondern Öl gewählt wird, bis auf $^1/_{20\,000}$ ja $^1/_{40\,000}$ Sekunde heruntergedrückt werden kann, so daß elektrische Schwingungserscheinungen bis etwa zur Grenze 1000 Perioden in der Sekunde ohne merkliche Trübung der Feinheiten durch die Eigenschwingungen mit ihm untersucht werden können. Hier, wie bei allen weiteren Oszillographen, wird durch den Wechselstrom nur eine seiner Stärke proportionale Ablenkung des Feldträgers, bzw. des auf ihm befestigten Spiegels bewirkt; um diese mit der Kurvenform von $\tilde{J}$ variierenden Ordinatenwerte aus der Lichtlinie in eine Lichtkurve überzuführen oder auseinanderzuziehen, bedarf es noch einer gleichzeitigen Abszissenbewegung des Lichtpunktempfängers, wie sie weiter unten angegeben werden soll.

Die Weicheisentype scheint aber in der weiteren Entwickelung immer mehr von der Drehschleifentype verdrängt worden zu sein, wenigstens ist diese bei den übrigen Oszillographen, wie dem von DUDDELL und der Firma S. & H., allein zur weiteren Ausbildung gelangt. Die Grundlage dieser Type bildet der THOMSONsche Syphonrekorder (vgl. Bd. XII, Seite 164) bzw. das aus ihm hervorgegangene Drehspulengalvanometer, nur mit dem Unterschied, daß die vom Strom durchflossene und aus seiner Nulllage im magnetischen Hauptfelde abgelenkte Drehspule hier nur von einer einzigen schmalen straff gespannten Meßschleife ersetzt wird, deren Eigenschwingungsdauer dadurch auf einen kleinen Bruchteil einer Sekunde, nämlich in den Hochfrequenzapparaten von DUDDELL bis auf $^1/_{10\,000}$ Sekunde, herabgesetzt wird.

57. Duddells Oszillograph.

Die Anordnung sei etwas näher in der von DUDDELL gewählten Ausführung beschrieben, bei der sie am deutlichsten erkennbar ist. Das Wesentliche des Schwingungssystems zeigt vergrößert Fig. 107. Zwischen den keilförmig

gestalteten Polen N und S eines kräftigen Elektromagneten ist in dem sehr schmalen Zwischenraum (Abstand zwischen N bzw. S und s nur 0·038 mm) ein schmales Metallband ss in Form einer Schleife gespannt, die mit ihren offenen Enden zu den Zuführungsklemmen des zu untersuchenden Wechselstromes führt, während das geschlossene Ende bei P mit Hilfe einer Federwage verschieden stark angespannt werden kann (vgl. hierzu Fig. 108). Die Meßschleife ss trägt einen sehr kleinen und leichten Spiegel M und verläuft zur besseren Dämpfung der Schwingungen in einem mit zähen Öl gefüllten

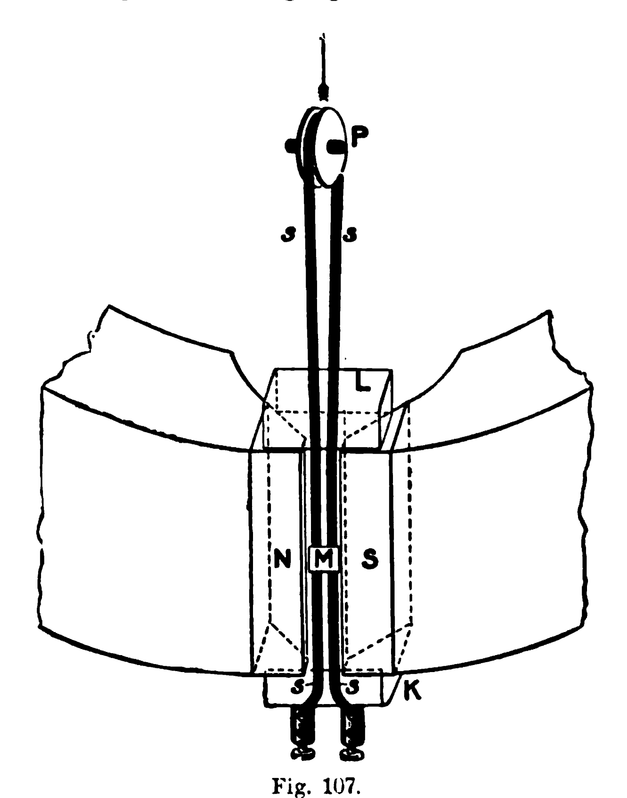


Fig. 107.

schmalen Zwischenraum, der außer von N und S noch durch den Klemmenträger L und eine vorn aufgelegte kleine Linse gebildet wird, welche nur durch die Oberflächenspannung des Öles gehalten wird.

Von den verschiedenen Ausführungen läßt der Oszillograph für Demonstrationszwecke (Fig. 108) für Periodenzahlen zwischen 20 und 100 in der Sekunde die wesentlichen Teile der eben beschriebenen Anordnung am deutlichsten erkennen, so die in 12 Abteilungen angeordnete Erregerwickelung für den Elektromagnet, die Anschlüsse für die hier doppelt ausgeführte Meßschleife zur gleichzeitigen Aufzeichnung von Strom- und Spannungskurven, sowie endlich die Spannvorrichtung, welche die mechanische Spannung beider Meßschleifen durch Verstellen der obersten Federwagenschraube gleichzeitig bewirkt.

Das Schaltungsschema für einen solchen Doppel-Oszillographen zeigt Fig. 109 für Niederspannungskreise und Fig. 110 für Hochspannungskreise. Hierin bezeichnet R_3 den nichtinduktiven Nebenschlußwiderstand, der von der Hauptstromstärke $\tilde{J}$ durchflossen wird. Von dieser wird mit Hilfe des

veränderlichen induktionsfreien Widerstandes R_2 für die Stromschleife, welche durch Schlüssel S_1 und Sicherung f_1 angeschlossen ist, so viel Meßstrom abgezweigt als der betreffende Apparat bedarf — bei Hochfrequenz-Laboratoriums-Oszillographen etwa 0·05 bis 0·1 Amp., beim Demonstrationsapparat der Figur 108 etwa 0·5 Ampere. Die Versorgung der Meßschleife für die Spannung erfolgt bei Niederspannung mit Hilfe des Vorschaltwiderstandes R_1, der zur Erzielung der vorstehend notwendigen Meßstromstärken nach dem OHMschen Gesetz berechnet wird; bei Hochspannungskreisen werden für die alsdann erforderlichen hohen Widerstandswerte R_1 und R_3 (vgl. Fig. 110) besondere Hochspannungswiderstände in der durch Fig. 111 angegebenen Anordnung ausgeführt. R_2 in Fig. 109 und R_1 in Fig. 110 dienen lediglich dazu, durch Regulierung die Schwingungsweite des Lichtpunktes mit den zu messenden Ampere bzw. Volt in ein bestimmtes einfaches Verhältnis bringen zu können.

Der zur Aufzeichnung erforderliche Lichtpunkt P wird meist durch eine in Fig. 112 angedeutete Linsenanordnung gewonnen, wobei mit Rücksicht auf die Kleinheit des Spiegels M zur Erzielung einer hinreichenden Lichtintensität meist als Lichtquelle A eine Bogenlampe Verwendung findet.



Fig. 108.

Die erforderliche gleichförmige Abszissenbewegung zur Ausziehung der Lichtlinie in die Kurve wird bei photographischen Aufnahmen entweder mit Hilfe des früher (52) erwähnten Mittels der fallenden Platte bewirkt, meist jedoch mit Hilfe einer photographischen Registriertrommel nach Fig. 113; für Zwecke der unmittelbaren Beobachtung dient ein durch Synchronmotor (Fig. 114) bewegter Spiegel in der Gesamtanordnung der Fig. 115.

Einige Aufnahmen mit dem vorstehend beschriebenen Oszillographen geben die Fig. 116 und 117 wieder. Außerdem zeigen die Figuren neben der

kontinuierlichen Oszillographenkurve die gleichzeitig mit dem JOUBERT-Verfahren aufgenommenen Punkte und zwar Kurve a die EMK eines unbelasteten Wechselstromgenerators nach der Induktortype, Kurve b die Spannungs- und Kurve c die Stromkurve bei induktionsfreier Belastung.

Weiterhin geben noch Fig. 118 u. 119 zwei von TH. SIMON (vgl. 1905 Ph. Z. VI, 297 u. ff.) mit einem solchen DUDDELLschen Hochfrequenzoszillo-

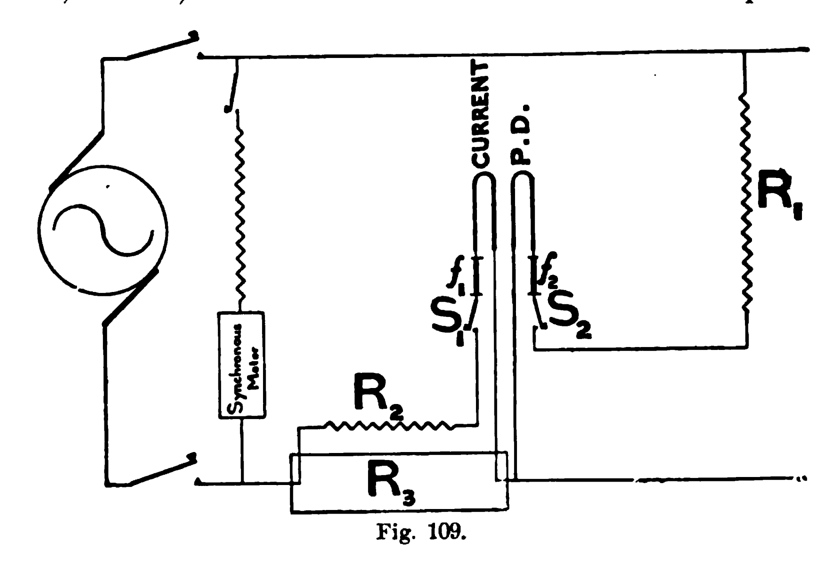


Fig. 109.

graphen gemachte Aufnahmen wieder, und zwar stellt Fig. 118 die Spannungskurve eines Wechselstromlichtbogens zwischen Homogenkohlen mit ihrem

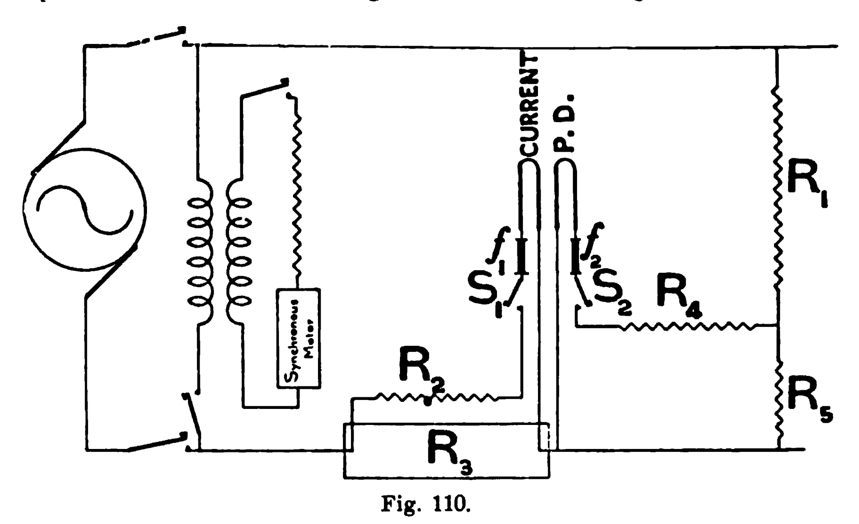


Fig. 110.

charakteristischen Sattel und die zugehörige Stromkurve dar, während Fig. 119 die Veränderung beider Kurven zeigt beim Verlöschen durch rasche Vergrößerung des Vorschaltwiderstandes bei einem solchen Lichtbogen von 3 mm Länge und einer Betriebsspannung von $\tilde{E} = 200$ Volt.

58. Oszillograph von S. & H. Von den deutschen Firmen hat sich namentlich S. & H. die Ausbildung eines Oszillographen, der auf dem Drehschleifenprinzip beruht, angelegen sein lassen. Die äußere Gesamtansicht des ganzen Apparates zeigt Fig. 120,

welche links die Bogenlampe zur Erzeugung eines geeigneten Lichtpunktes P (vgl. Fig. 112) erkennen läßt, vorn die verschiedenen Schalter für Bogenlampe, Meßschleife, Synchronmotor zur Aufnahme mittels photographischer Trommel. Diese wird in der Dunkelkammer mit Film versehen, in den rechts sichtbaren lichtdichten Sack verbracht und nach Anschluß des letzteren, wie in Fig. 120, in den Apparat hinübergeschoben. Ehe die Belichtung erfolgt durch Drücken des oberhalb der Schalter sichtbaren Hebels, wird die Welle, welche für photographische Trommel und Beobachtungsapparat gemeinsam ist, mit Hilfe der links vom lichtdichten Sack sichtbaren Kurbel von Hand auf Touren gebracht und auf Betrieb mittels Synchronmotors — eines 4 poligen Einphasenmotors — umgeschaltet. Der Beobachtungsapparat, welcher einerseits zum subjektiven Studium der Kurvenformen, andererseits zur Kontrolle über das Vorhandensein der zu photographierenden Kurven in gewollter Form und Größe dient, besteht aus einem spiegelnden prismatischen Körper mit spiralig gekrümmter Oberfläche, welche die oben (56) erwähnte Ausziehung des ruhenden Lichtpunktes zur Abszissenachse, bzw. der von M (Fig. 112) auf ihn fallenden Lichtlinie zur Kurve für das Auge des Be-



Fig. 111.

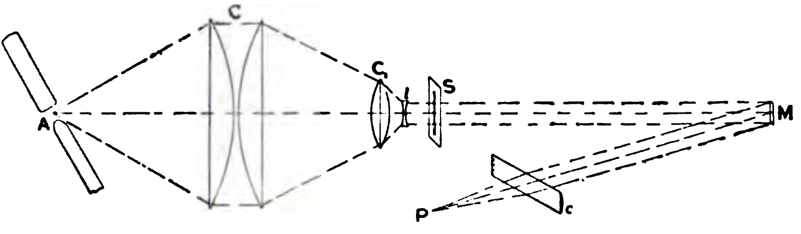


Fig. 112.

obachters zur Folge hat, wobei die Kurvenform bei synchroner Geschwindigkeit dem Auge stillstehend und gleichsam in der Luft schwebend erscheint.

Um die Verwendung des Oszillographen sowie einige mit ihm erhaltenen charakteristischen Wechselstromkurven anzuführen, seien folgende im Laboratorium der Firma S. & H. aufgenommenen Kurven nebst erläuterndem Begleittext wiedergegeben:

Es eignen sich zur Aufnahme von Oszillogrammen Spannungs- und Stromkurven von elektrischen Maschinen, elektrischen Apparaten und ganzen Anlagen. Man kann aus den Oszillogrammen fernerhin ersehen den Einfluß der verschiedenartigsten Belastungszustände auf die Kurvenform, die Verzerrung der Kurvenform durch das Vor-

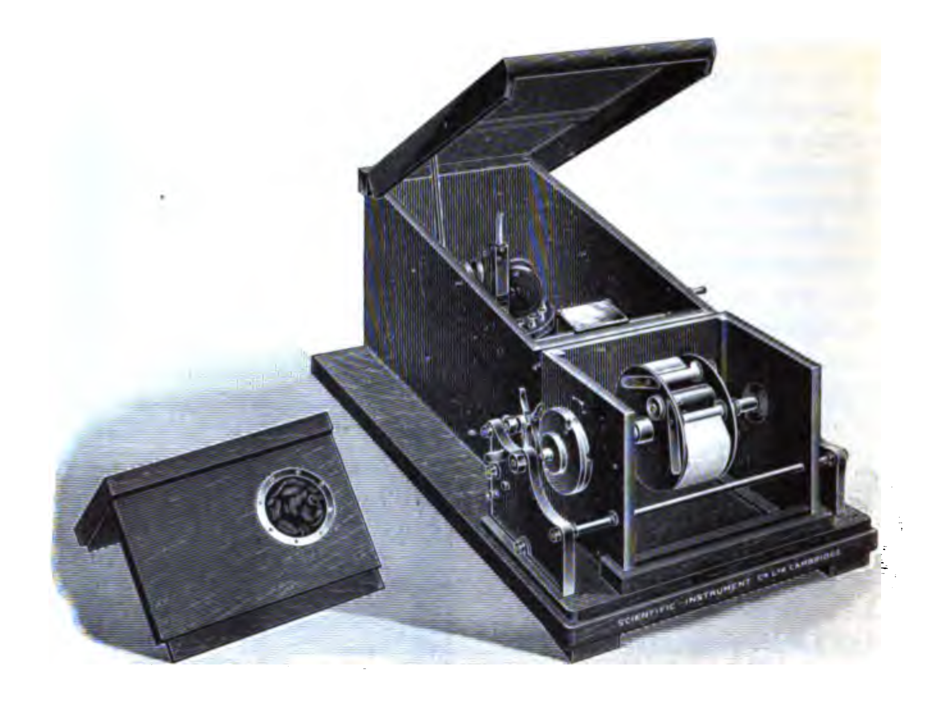


Fig. 113.

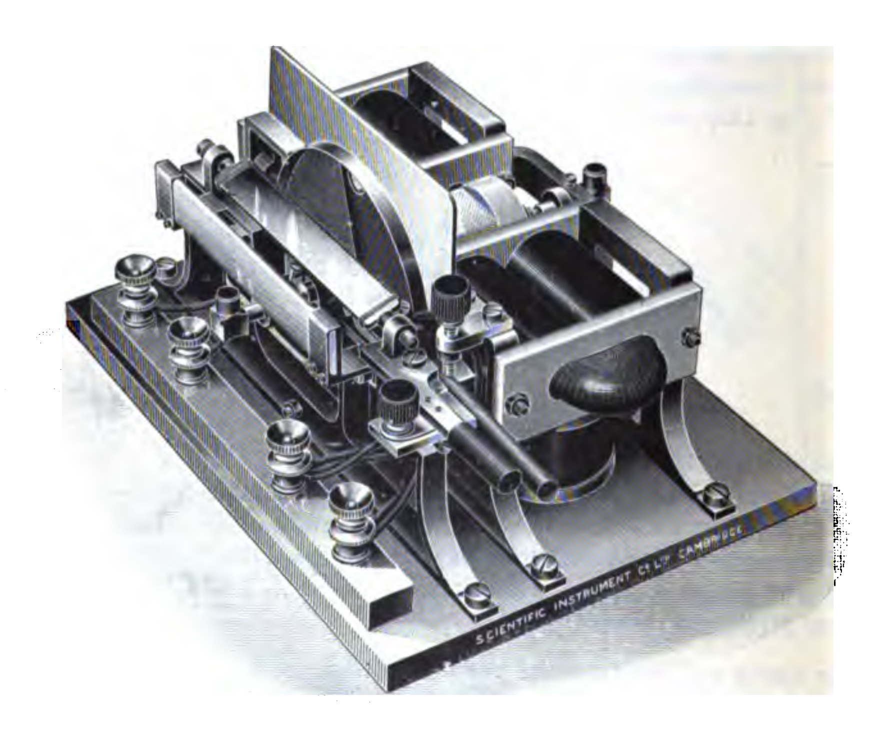


Fig. 114.

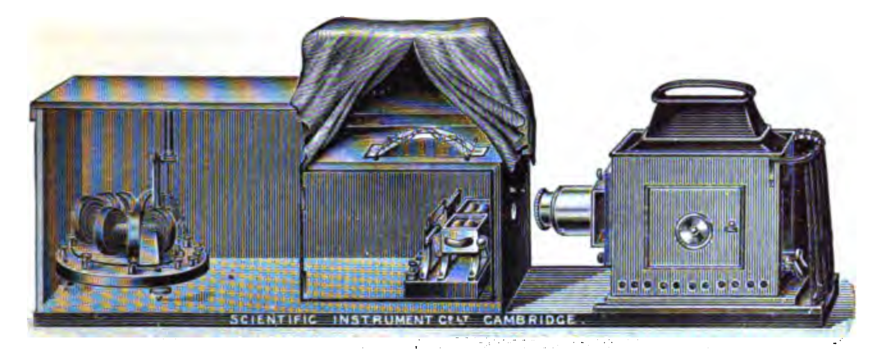


Fig. 115.

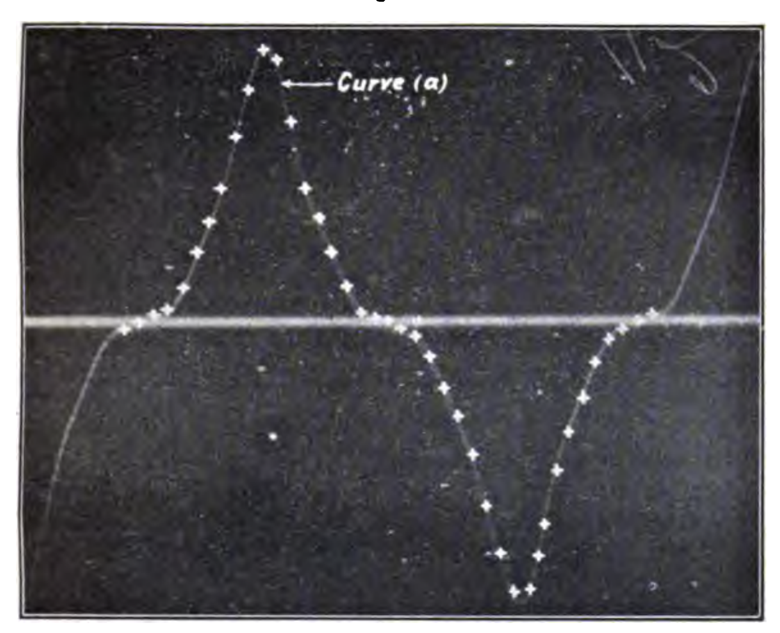


Fig. 116.

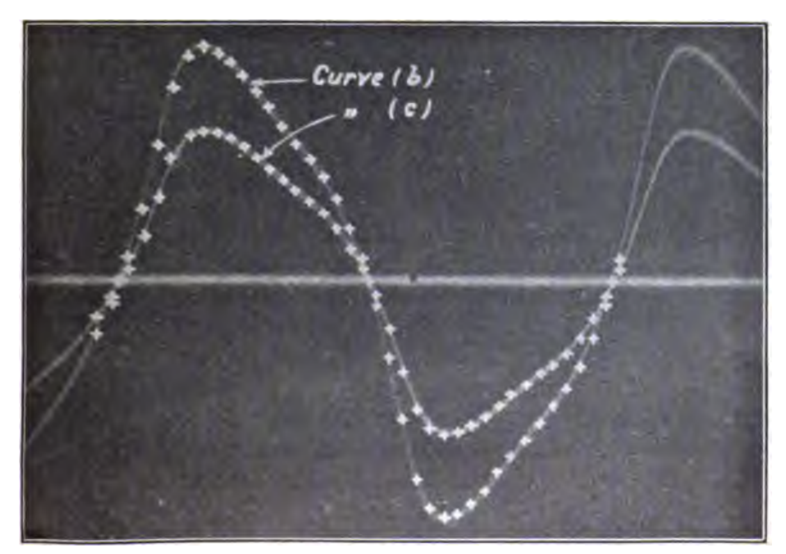


Fig. 117.

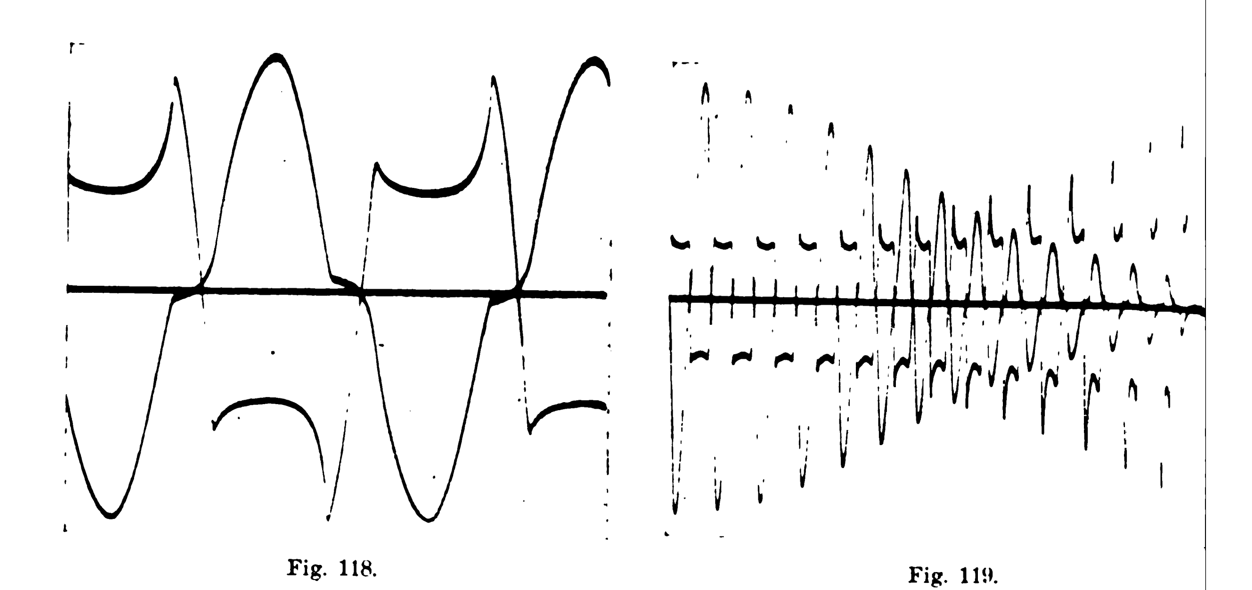


Fig. 118. Fig. 119.

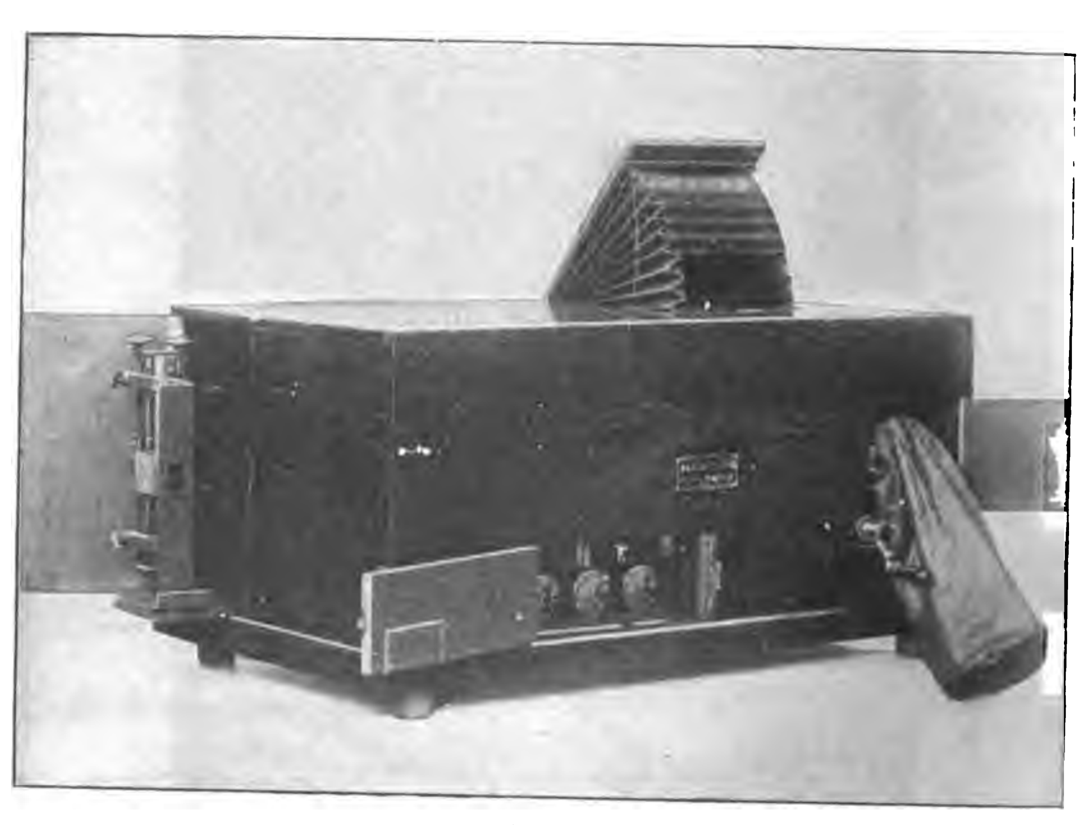


Fig. 120.

handensein von Selbstinduktion oder Kapazität, das Wesen von Überspannungen jeder Art bei Kurzschlüssen, bei Durchschmelzen von Sicherungen,[1]) bei Ein- und Ausschalten von Kabel- und Freileitungsnetzen und dergleichen mehr.

Nachstehend sind 10 verkleinerte Oszillogramme wiedergegeben:

Fig. 121: Stromkurve eines Einphasen-Wechselstrom-Synchronmotors.
Fig. 122: Spannungskurve der mit Wechselstrom betriebenen Bogenlampe des Apparates.

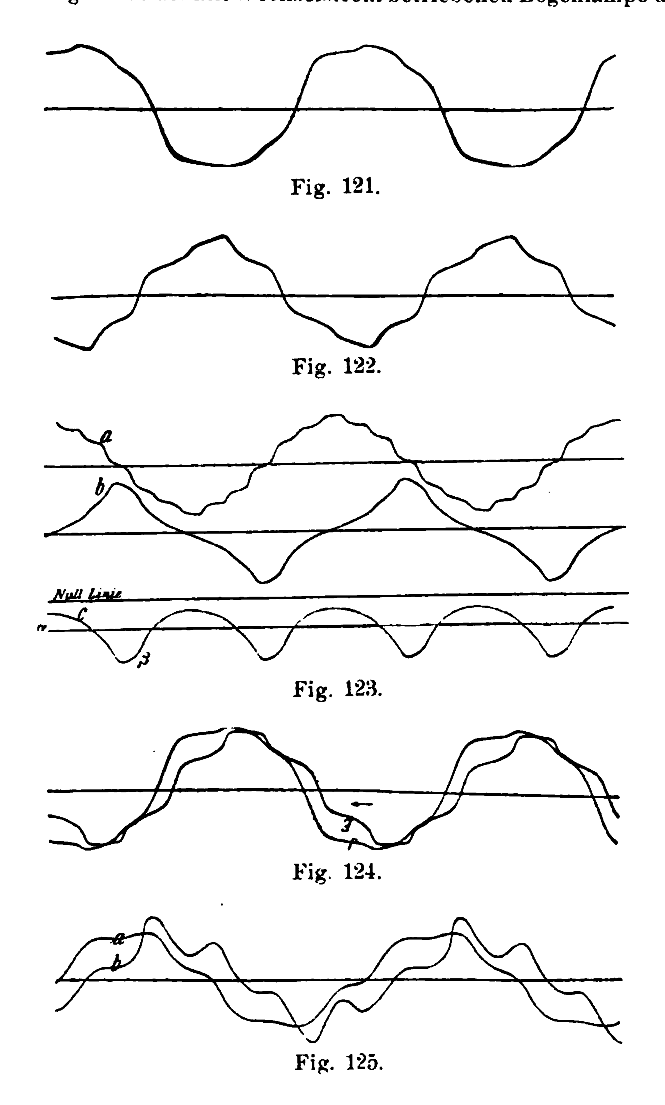


Fig. 121.

Fig. 122.

Fig. 123.

Fig. 124.

Fig. 125.

Fig. 123: a) Spannungskurve eines Einphasen-Generators im Leerlauf.
b) Kurzschlußstrom desselben Generators.
c) Rückwirkung des Kurzschlußstromes auf das Erregerfeld bzw. auf den Erregerstrom.
α) Erregung im Leerlauf.
β) Erregerstrom im Kurzschluß, wobei im Stromkreise keine weiteren Änderungen vorgenommen werden.

---

1) Vgl. ETZ 1904, Heft 35: E. Oelschläger, Über den zeitlichen Verlauf des Schmelzstromes von Sicherungen, beobachtet mit den Oszillographen."

(Aus den Kurven ist ersichtlich, daß der Kurzschlußstrom um 90° gegen die Spannung verschoben ist und daß die höheren Harmonischen im Kurzschlußstrom abgedämpft sind. Alle 3 Kurven sind auf ein Blatt geschrieben.)

Fig. 124: Strom- und Spannungskurve eines Einphasen-Synchronmotors auf dieselbe Nullinie geschrieben.

(Man sieht die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung.)

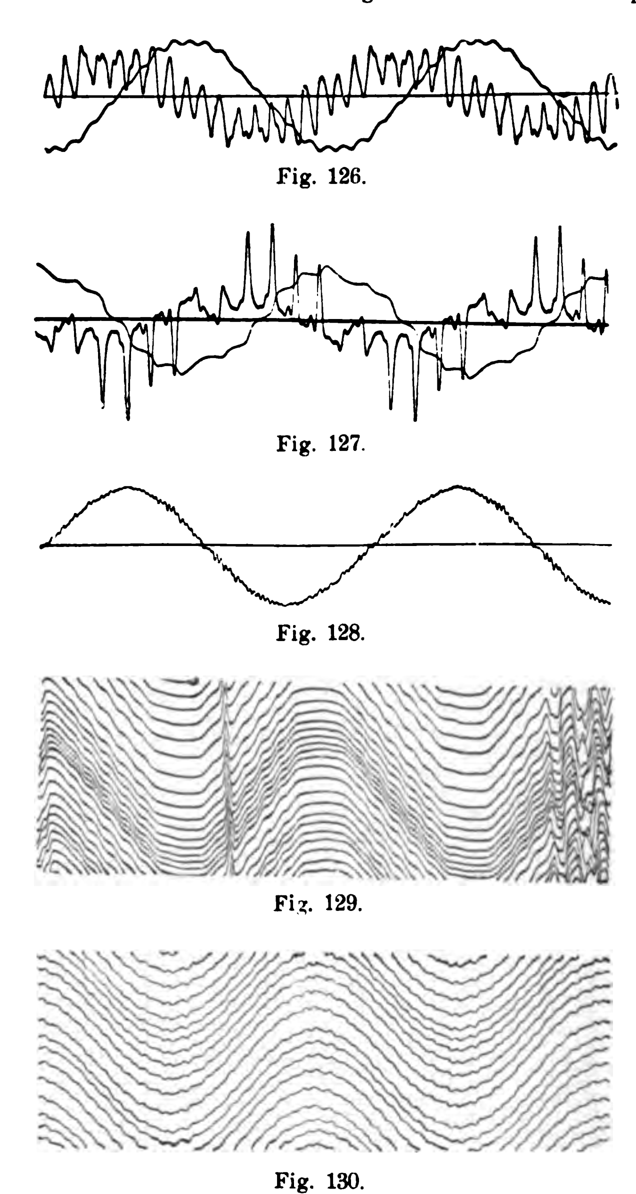


Fig. 126.

Fig. 127.

Fig. 128.

Fig. 129.

Fig. 130.

Fig. 125: Spannungskurve mit und ohne Selbstinduktion (mit Hysterese).

Kurve *a* stellt die Spannungskurve an den Klemmen eines Generators dar. Kurve *b* zeigt die Spannung an den Sekundärklemmen eines mit dem genannten Generator gespeisten Transformators, dem jedoch primär ein großer induktionsfreier Widerstand vorgeschaltet ist.

Fig. 126: Spannungs- und Stromkurve an einem Kondensator.

Fig. 127: Dieselbe Aufnahme mit einem anderen Generator.

Die Kurven Fig. 126 und 127 zeigen, daß die Maxima und Minima der Spannungskurve den Nullpunkten der Stromkurve entsprechen und daß an den Stellen, an welchen man an die Spannungskurve Wendetangenten anlegen kann, in der Stromkurve relative Maxima und Minima auftreten. Die Neigung dieser Wendetangenten entspricht dem absoluten Werte der Maxima.

Die Kurven erbringen daher den bildlich dargestellten Beweis für die Richtigkeit der Gleichung

$$J_{\text{Kondens.}} = C \frac{dE}{dt}.$$

Fig. 128: Wechselstrom-Spannungskurve eines Einankerumformers mit sehr wenig Kollektorlamellen.

(Die durch die Bürsten hervorgerufenen vorübergehenden Kurzschlüsse von Ankerspulen machen sich in der Wechselstromkurve durch entsprechende momentane Erniedrigung der Spannung kenntlich. Die Lamellenzahl des Kollektors läßt sich aus der Anzahl der Spannungsdepressionen direkt ablesen.)

Fig. 129: Einfluß von schlechten Lamellen eines Einankerumformers auf die Kurven form der Wechselstromspannung.

(Die durch Drehen der Meßschleife erzielte Aufnahme zeigt, daß durch schlechte Lamellen der periodische Verlauf der Spannungskurve des Wechselstromes erheblich gestört wird.)

Fig. 130: Spannungskurven, entnommen den Sammelschienen eines Drehstrom-Elektrizitäts-Werkes.

Zu Fig. 129 u. 130 sei noch bemerkt, daß diese Aufnahmen mit vielen untereinander geschriebenen Kurven durch eine Verschiebungsvorrichtung der Meßschleife während der Aufnahme erzielt sind und aus einer Drehung der Meßschleife um ihre vertikale Achse folgen.

Bei den Stromkurven der Fig. 126 u. 127 ist zu beachten, daß diese dadurch erhalten wurden, daß in Reihe mit der Meßschleife ein Kondensator geschaltet war, wodurch die höheren Harmonischen der Spannungskurve nach der Gleichung $\tilde{J} = \omega \cdot C \cdot \tilde{E}$ infolge Anwachsens der ω-Werte stark hervorgehoben, also die Kurvenbuckel der $\tilde{E}$-Kurve sehr stark karikiert werden und in der $\tilde{J}$-Kurve in Form übergelagerter Schwingungen von verhältnismäßig großer Schwingungsweite erscheinen.

Von physikalischen Vorrichtungen zur photographischen Registrierung veränderlicher Strömungsvorgänge sei noch auf die Verwendung des Saitengalvanometers nach EINTHOVEN in der Anordnung von M. EDELMANN jun. (vgl. 1906 Ph. Z. VII, 115) verwiesen.

59. Formfaktor. Graphische Ermittelung aus Kurvenform.

Der Formfaktor f einer Wechselstromkurve, der nach den früheren Ausführungen (I, 1 in **100**) das Verhältnis des effektiven Mittelwertes $\left(\tilde{E} = \sqrt{\frac{1}{\tau}\int_0^\tau e^2\,dt}\right)$ zu dem Kraftlinienmittelwert $\left(\tilde{E}_N = \frac{1}{\tau}\int_0^\tau e \cdot dt\right)$ angibt, kann entweder aus den gewonnenen Kurvenformen auf graphischem Wege abgeleitet werden, oder auch nach einem von ROSE und KÜHNS (ETZ 1903, 992) angegebenen Kontaktmacherverfahren mit Wattmeterbenutzung direkt gemessen werden.

Bei der graphischen Ableitung von f wird die Kurve, deren Verlauf nach einem der vorstehend angeführten Verfahren gewonnen wurde, in rechtwinkligen Koordinaten aufgetragen, wie dies die untere Hälfte der Fig. 131 erkennen läßt. Die Planimetrierung bzw. Auswertung ihres Flächeninhaltes

nach der SIMPSONschen Regel liefert $\int_0^\tau y\,dt$ oder den Integralwert einer Halbwelle, und die Reduzierung der Fläche auf die Wechselzeit τ als Basis liefert $\frac{1}{\tau}\int_0^\tau y\,dt$ oder den einfachen Mittelwert in der strichliert angegebenen Rechteckhöhe. Trägt man weiterhin die Momentanwerte y der unteren Kurve

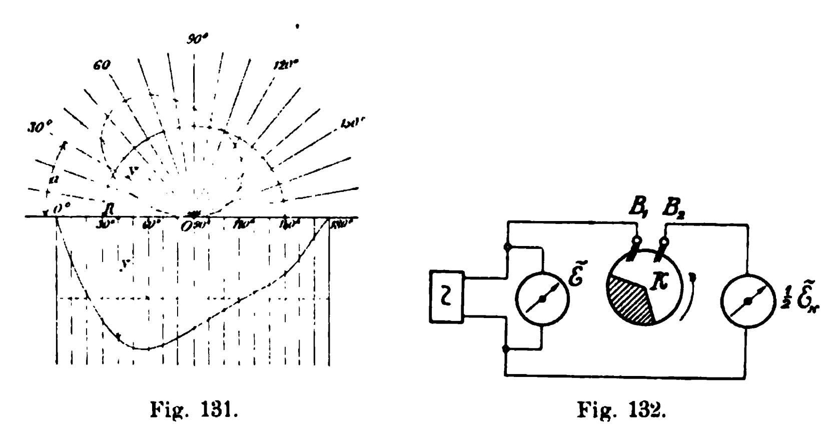


Fig. 131. Fig. 132.

auf den zugehörigen Fahrstrahlen der oberen Figurhälfte, d. h. in Polarkoordinaten auf, so liefert die so gewonnene, in sich geschlossene Polarkurvenfläche ihrem Inhalt nach den Wert

$$\int_0^\tau \frac{y^2}{2}\cdot dt.$$

Ersetzt man diese Fläche durch den Halbkreis von gleichem Flächeninhalt, so daß also $\frac{\pi}{2}\cdot RO^2 = \frac{1}{2}\int_0^\tau y^2\cdot dt$, so liefert die Länge des Radius OR den gesuchten wirksamen (effektiven) Mittelwert

$$RO = \sqrt{\frac{1}{\tau}\int_0^\tau y^2\,dt}.$$

Eine weitere Methode der graphischen Ermittelung wurde von FLEISCHMANN (ETZ 1897, 35) angegeben.

60. Messung nach Rose u. Kühns.

Will man die etwas umständliche graphische Ermittelung, die auch nur bei großer zeichnerischer Sorgfalt befriedigende Ergebnisse liefert, durch eine elektrische Messung ersetzen, so verwendet man am besten das von ROSE und KÜHNS angegebene Verfahren, indem man durch eine geeignete Kontaktvorrichtung den einfachen Mittelwert einer Halbwelle,[1]) d. i. den

---

1) An dieser Stelle sei an folgende Bestimmungen durch Erlaß des Bundesrates (Reichsges.-Bl. 1901 Nr. 16) erinnert:

4. a) Als wirksame (effektive) Stromstärke — oder wenn nichts anderes festgesetzt ist, als Stromstärke schlechthin — gilt die Quadratwurzel aus dem zeitlichen Mittelwerte der Quadrate der Augenblicksstromstärken.

Nennerwert von f zur Messung bringt, da der wirksame Mittelwert, d. i. der Zähler von f ja durch alle Wechselstrommeßinstrumente ohne weiteres geliefert wird.

Wählt man die Kontaktvorrichtung so, daß mit Hilfe zweier verstellbarer Bürsten B_1, B_2, die auf der Kontaktscheibe K schleifen (vgl. Fig. 132, sowie auch Fig. 98 in **54**) gerade nur immer die eine Halbwelle, z. B. die positiv gerichtete, dem polarisierten Spannungsmesser zugeführt wird, während die andere (negativ gerichtete) abgeschaltet wird, so zeigt der polarisierte Spannungsmesser, indem er die veränderlichen Augenblicksantriebe selbsttätig integriert — verhältnismäßig große Schwingungsdauer seines Zeigersystems gegenüber der Periodendauer des Wechselstromes vorausgesetzt — den h a l b e n Wert der mittleren Spannung ($\tilde{E}_N$) (vgl. hierzu das über die Messung von Wellenstromgrößen Gesagte in **111** ff.). Da die gleichzeitige Verschiebung beider Bürsten B_1 und B_2 durch Drehung des gemeinsamen Bürstenhalters den Beginn und das Ende des Kontaktes auf der leitenden (nicht schraffierten) Fläche von K bestimmt, die gegenseitige Verschiebung von B_1 gegen B_2 die Dauer des Kontaktes (bei synchroner Bewegung von K mit der zu untersuchenden Wechselspannung) regelt, so braucht man die Bürsten nur so lange zu verstellen, bis der polarisierte Spannungsmesser bei sonst gleichen Verhältnissen ein verhältnismäßiges Maximum des Ausschlages liefert. Nach Angaben von Rose und Kühns gelingt dies ohne Schwierigkeit, wenn Kontaktscheibe K und Bürsten B sauber gehalten und vor jeder Einstellung die Scheibe mit einem in Petroleum getauchten Lappen abgerieben wird. Als polarisierten Spannungszeiger haben Rose und Kühns zur Vermeidung etwaiger Induktionswirkungen ein direktzeigendes Wattmeter benutzt (vgl. a. a. O.), dessen Hauptfeld durch einen konstanten Gleichstrom in der Hauptstromspule erzeugt wurde, während die Spannungsspule am Kontaktmacher lag. Nach meinen Untersuchungen mit Wellenstrom sind keine Bedenken gegen die Richtigkeit der Angaben gewöhnlicher polarisierter Voltmeter, am besten Drehspuleninstrumente, zur Messung von $\frac{1}{2}\tilde{E}_N$ und gegen die dadurch erzielte große Vereinfachung der Meßanordnung (vgl. Fig. 132) vorhanden, wie auch durch vergleichende Messungen von Rose und Kühns bestätigt worden ist.

61. Kurvenanalyse. Die Kurvenanalyse, d. h. die Zerlegung der Wechselstromkurven in die Grundschwingung und in höhere Harmonische nebst Ermittelung ihrer gegenseitigen Größe und Phasenverschiebung, ist für die Zwecke der absoluten Koeffizientenbestimmung (siehe in **15**) von Wichtigkeit. Sie kann entweder unter Zugrundelegung der empirisch ermittelten Kurvenformen (vgl. oben) mit Hilfe eigener Apparate, sog. harmonischer Analysatoren, wie sie von Henrici u. A. erdacht worden sind, oder in Ermangelung eines solchen kostspieligen Meßmittels mit Hilfe eines von Perry (siehe El. XXVIII, 362) angegebenen, wenn auch etwas mühsamen rechnerischen Verfahrens vorgenommen werden; endlich ist sie auch mit Hilfe elektrischer Messungen

---

b) Als mittlere Stromstärke gilt der ohne Rücksicht auf die Richtung gebildete zeitliche Mittelwert der Augenblicksstromstärken.

d) Als Scheitelstromstärke periodisch veränderlicher Ströme gilt deren größter Augenblickswert.

e) Die unter a bis d für die Stromstärke festgesetzten Bezeichnungen und Berechnungen gelten ebenso für die EMK oder die Spannung.

nach einem von DES COUDRES (ETZ 1900, 752) angegebenen Verfahren ausführbar. Nur dieses letztere soll hier angeführt werden.

Diese unmittelbare, d. h. durch elektrische Messungen ausgeführte Kurvenanalyse beruht auf der Eigenschaft jedes Elektrodynamometers (am besten in der Form eines Wattmeters), dauernde Ausschläge bei Wechselstrom nur dann zu liefern, wenn in der beweglichen und in der festen Spule Ströme genau gleicher Periode fließen, wie dies z. B. bei der gebräuchlichen Schaltung der Fall sein muß, bei der beide Spulen in denselben Wechselstromkreis eingeschaltet werden (vgl. Fig. 134 in **63**). Schaltet man hingegen beide Spulen in getrennte Wechselstromkreise, so macht das Wattmeter bei größerer Differenz der sekundlichen Periodenzahlen ν_H in der Hauptstromwickelung und ν_{Sp} in der Spannungswickelung auch bei hohen Werten von $\tilde{J}_H$ und $\tilde{J}_{Sp}$ gar keine Angabe wegen zu großer Eigenschwingungsdauer; bei kleinen Unterschieden von ν_H und ν_{Sp} führt der Zeiger Pendelungen um die Nulllage aus, Schwebungen, deren Entstehung Fig. 84 in **50** strichliert andeutet und die als Maß für den Unterschied der Periodenzahlen in der Sekunde dienen können. U. a. können sie auch zur Messung der Schlüpfung von Asynchronmotoren (**47**) bei kleiner Belastung benutzt werden, wenn die Hauptstromspule zwischen Läuferschleifring und Anlasserklemme eingeschaltet wird und die Spannungsspule mit Vorschaltwiderstand wie ein Voltmeter an zwei Ständerklemmen angeschlossen wird.

Diese Eigenschaft, welche sich aus der Grundlage der Wirkungsweise dieser Instrumente mit zwei kontrastierenden magnetischen Stromfeldern ableiten läßt (vgl. II, 1 in **26**), wurde von DES COUDRES in folgender Weise zur Analyse von Stromkurven benutzt: Durchfließt die zu analysierende Stromkurve $\tilde{J}_H$, welche aus einer Grundschwingung und aus ungeraden höheren Harmonischen besteht (**15**), die Hauptstromwickelung eines Wattmeters, und sendet man mit Hilfe eines Sinusinduktors durch die Spannungsspule Ströme $\tilde{J}_{Sp}$, die möglichst angenäherte Sinusform besitzen, sowie mit Periodenzahlen, die genau das 1, 3, 5fache usw. von $\tilde{J}_H$ betragen, so können bei gleich großem $\tilde{J}_{Sp}$ die erhaltenen Dauerausschläge nur ein Maß für die Größe der in $\tilde{J}_H$ enthaltenen höheren Harmonischen von gleicher Periodenzahl mit $\tilde{J}_H$ sein. Wird z. B. die Grundwelle von $\tilde{J}_H$ mit $\tilde{J}_1$ bezeichnet und gleich 100 gesetzt, so fanden sich in einem Falle

$\tilde{J}_1$	$\tilde{J}_3$	$\tilde{J}_5$	$\tilde{J}_7$	$\tilde{J}_9$
100	16·85	2·41	1·67	1·43

Wird weiterhin noch die Phase von $\tilde{J}_{Sp}$ gegenüber der Nulllage von $\tilde{J}_1$ bestimmt (siehe hierüber a. a. O. Seite 754), so kann auch die Phasenverschiebung der höheren Harmonischen ermittelt werden, z. B. im obigen Fall

$$x = \tilde{J}_H = 100 \cdot \sin(\omega t) + 16{\cdot}97 \cdot \sin(3\,\omega t + 154^0) + 2{\cdot}46 \cdot \sin(5\,\omega t + 143^0)$$
$$+ 1{\cdot}70 \cdot \sin(7\,\omega t + 156^0) + 1{\cdot}43 \sin(9\,\omega t + 121^0).$$

Weiteres über die naturgemäß etwas mühsame Methode siehe a. a. O.

F. Leistung und Phasenverschiebung.

62. Allgemeines und Übersicht.

Bei Behandlung der energetischen Seite der elektrischen Ausgleichvorgänge ist bereits früher (I, 2 in **156** bis **158**) darauf hingewiesen worden, daß

die Ermittelung der endgültig innerhalb eines Stromkreisteiles aus der elektrischen in eine nichtelektrische Energieform übergeführten Leistung bei Wechselstrom und Wellenstrom nicht nur technisch eine hervorragende Wichtigkeit besitzt, sondern vielfach zur Aufklärung der Ausgleichvorgänge ganz unerläßlich ist. Dementsprechend bilden auch die Verfahren zur Messung der Wechselstromleistung einen besonders wichtigen Abschnitt für den Elektrotechniker. Für den Elektrophysiker wäre dies zwar in gleicher Weise der Fall. Wenn trotzdem die Erkenntnis der Notwendigkeit solcher Leistungsmessungen gerade erst anfängt von der Technik aus in die Kreise der Physiker einzudringen, so erklärt sich dies auf Grund der historischen Entwickelung. In den Anschauungen der Gleichstromverhältnisse groß geworden erkannten die Elektrophysiker einmal die wichtige Rolle des Leistungsfaktors ($\cos \varphi$) bei allen elektrischen Ausgleichvorgängen mit Wechselstromkomponenten und der daraus sich ergebenden Notwendigkeit einer gesonderten Leistungsmessung neben der Bestimmung von Spannung $\bar{E}$ und Stromstärke $\bar{J}$ viel später, und ein zweites Mal mußte die Wechselstrommeßtechnik erst die erforderliche Entwickelung erfahren, um diesem Bedürfnis Rechnung tragen zu können. Da diese Entwickelung nun hauptsächlich mit der Entwickelung der Wechselstromtechnik verknüpft war und die Bedürfnisse der Starkstromtechnik nach dieser Richtung zuerst befriedigte, so erklärt es sich, daß auch heute die Meßtechnik nach Richtung der Bestimmung von Wechselstromleistungen auf dem Gebiete der Schwachstromtechnik noch etwas im Argen liegt, zumal die meßtechnischen Schwierigkeiten hier entschieden größere sind als in der Starkstromtechnik.

Während bei Gleichstrom eine eigene Leistungsmessung und damit auch eigene Meßinstrumente und -methoden für eine solche völlig unnötig sind, weil sich die umgesetzte Leistung $\overline{W}$ stets ohne weiteres als das Produkt aus den verhältnismäßig leicht bestimmbaren Werten der Spannung $\overline{E}$ an den Enden des betrachteten Stromkreisteiles und der Stromstärke $\overline{J}$ in demselben zu $\overline{W} = \overline{E} \cdot \overline{J}$ ergibt, so liegen die Verhältnisse bei Wechselstrom (bzw. Wellenstrom) mit dem im allgemeinen zwischen Generator und Konsumapparat äußerst rasch hin- und herpendelnden Energiebeträgen (siehe hierzu I, 2 in **157** bei Fig. 106) wesentlich anders. Hier kann die endgültig vom Generator abgegebene, oder die von einem bestimmten Stromkreisteil aufgenommene, d. h. in nicht elektromagnetische Energieform übergeführte Leistung nur mit Hilfe einer besonderen Leistungsmessung ermittelt werden. Das technisch weitaus wichtigste Verfahren der Leistungsmessung bei Wechselstrom — der Wellenstrom ist im folgenden Abschnitt (**117** ff.) gesondert behandelt — bildet die Benutzung von Elektrodynamometern, bei denen die eine Stromspule als Strommesser, die andere als Spannungsmesser (vgl. II, 1 in **26**) geschaltet wird, eine Schaltungsweise, die kurz durch den besonderen Namen „Wattmeter" gekennzeichnet zu werden pflegt. Neben diesen bequemen Wattmetern, welche die in Größe und Richtung fortwährend wechselnden Augenblicksleistungen selbsttätig zu dem gewünschten Leistungsmittelwert integrieren, kommen für Einphasenstrom in gewissen Laboratoriumsfällen noch einige Methoden in Frage, die aus je 3 zusammengehörigen Spannungs- oder Strommessungen eine Ermittelung der Leistungskomponente bzw. des umgesetzten Leistungsbetrages gestatten. Bei verketteten Mehrphasenströmen kommen für die Technik wohl nur die Wattmetermethoden in Frage.

a) Leistungsmessung bei Einphasenstrom.

63. Wattmetermethoden. Schaltungen und Schaltungskorrektionen.

Die Wattmeter selbst sind teils in Bd. II, 1 behandelt, ihre Grundlagen und Verwendbarkeit in Artikel 26, die Theorie und Ausführungsformen der Laboratoriumsapparate in Artikel 87 bis 94, teils werden die technischen Instrumente noch näher in der folgenden Abteilung dieses Bandes beschrieben. Zu den Laboratoriumsinstrumenten und namentlich zu den Spiegelwattmetern (II, 1 in 90) wäre nur noch nachzutragen, daß diese neuerdings (D. R. P. Nr. 170872 von KRUKOWSKI und FISCHER) in der Gestalt der Kompensationswattmeter eine vielversprechende Bereicherung erfahren haben. Bei diesen Wattmetern – ähnlich auch bei anderen Wechselstromspiegelinstrumenten z. B. Elektrometern — wird nicht der Ausschlag gemessen, sondern das erforderliche Gleichstromdrehmoment ($\bar{D} = \bar{J}^2 \cdot C_\kappa$), welches auf ein zweites mit jenem

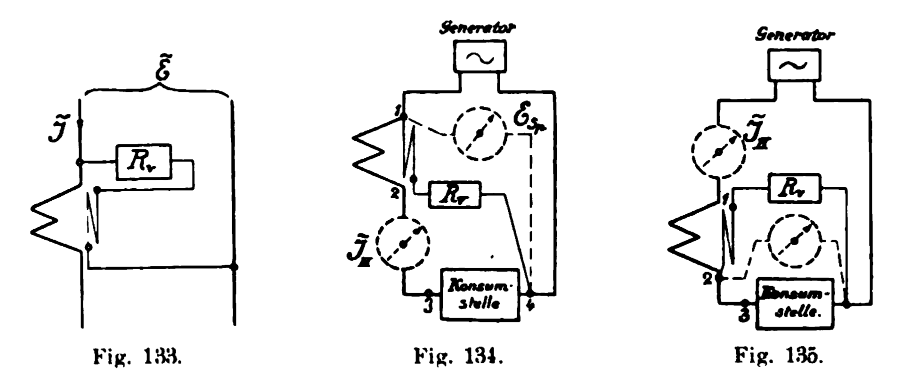


Fig. 133. Fig. 134. Fig. 135.

starr gekuppeltes (Elektrodynamometer-) Spulensystem ausgeübt werden muß, um jenem Wechselstromdrehmoment (bei Wattmetern $\tilde{D} = \tilde{E} \cdot \tilde{J} \cdot \cos\varphi = R_{Sp} \cdot \tilde{J}_{Sp} \cdot \tilde{J}_H \cdot \cos\varphi \cdot C_\kappa'$) das Gleichgewicht zu halten.

Hier würde es sich namentlich um die verschiedenen Schaltungen bei der Messung von Wechselstromleistungen handeln, sowie um die Auswertung ihrer Angaben.

Bei Einphasenstrom ist eine Auswahl zu treffen zwischen folgenden Schaltungen der verfügbaren Enden von Hauptstromspule und Spannungsspule einschließlich des häufig getrennt vorhandenen Vorschaltwiderstandes R_v, der je nach der Größe der zu messenden Spannung $\tilde{E}$ und der zulässigen Maximalstromstärke $\tilde{J}_{Sp}$ in der Spannungsspule zu $\tilde{E} : \tilde{J}_{Sp}$ gewählt wird. Zunächst ist die in Fig. 133 angedeutete Schaltung, bei der R_v zwischen Spannungsspule und Hauptstromspule eingeschaltet ist, entschieden zu vermeiden, namentlich bei Hochspannung, weil hierdurch die volle Spannung zwischen den beiden Wattmeterspulen auftritt, wofür ihre Isolation nicht berechnet ist, so daß leicht ein Kurzschluß mit Verbrennen des Wattmeters, wenn nicht ein ernsterer Unfall die Folge ist. Vielmehr gilt als erste Regel, daß stets das eine Ende der Spannungsspule mit dem einen Ende der Hauptstromspule möglichst direkt zu verbinden ist, wodurch eine Vermeidung der vom Sicherheitsstandpunkt unrichtigen Schaltung der Fig. 133 sich zwangläufig ergibt, ebenso wie die Herbeiführung einer völlig unschädlichen Spannung zwischen den beiden Wattmeterspulen, da sie wenige Volt nicht überschreiten kann.

Die Beachtung dieses Punktes vorausgesetzt, so bleiben für die gegen-

seitige Schaltung der beiden Spulenenden noch die in Fig. 134 und 135 angedeuteten Möglichkeiten, daß vom Generator aus gesehen das Spannungsspulenende an das vordere (Fig. 134), oder an das hintere Ende (Fig. 135) der Hauptstromspule angeschlossen wird. Die Schaltung der Fig. 134 mißt die zwischen Punkt 3 und 4 umgesetzte Leistung W_k der Konsumstelle zusammen mit der Leistung $\tilde{J}_H^2 \cdot R_H$, welche der Hauptstrom $\tilde{J}_H$ in Form von JOULEscher Wärme in dem Widerstand R_H zwischen Punkt 1 und 3 umsetzt. Die Schaltung der Fig. 135 mißt die zwischen Punkt 2 und 4 umgesetzte Leistung. d. i. hier die Leistung W_k der Konsumstelle einschließlich der im Spannungsspulenkreis verbrauchten Leistung $\tilde{J}_{Sp}^2 \cdot R_{Sp}$ bzw. $\tilde{E}_k^2 : R_{Sp}$ oder $\tilde{E}_k \cdot \tilde{J}_{Sp}$, falls R_{Sp} praktisch nur OHMschen Widerstand enthält.

Bezeichnen wir den Leistungsbetrag $\tilde{J}_H^2 \cdot R_H$ als Hauptstromkreiskorrektion, den Betrag $\tilde{J}_{Sp}^2 \cdot R_{Sp}$ bzw. $\tilde{E}_k^2 : R_{Sp}$ oder $\tilde{E}_k \cdot \tilde{J}_{Sp}$ als Spannungskreiskorrektion, so kann man die Anweisung für diese beiden Wattmeterkorrektionen, welche aus der Schaltung sich ergeben, in folgender Weise fassen: Soll die vom Generator abgegebene Leistung gemessen werden, so ist zu der Wattmeterangabe bei Schaltung nach Fig. 134 noch die Spannungskreiskorrektion, bei Schaltung nach Fig. 135 hingegen die Hauptstromkreiskorrektion hinzuzufügen, um die gesuchte Leistung in Watt zu erhalten; soll hingegen die von der Konsumstelle aufgenommene Leistung ermittelt werden, so ist von der Wattmeterangabe bei Schaltung nach der Fig. 134 die Hauptstromkreiskorrektion, bei Schaltung nach Fig. 135 hingegen die Spannungskreiskorrektion in Abzug zu bringen.

Ist für einen gegebenen Fall eine der beiden Korrektionen gegenüber der Wattmeterangabe $W = C_w \cdot \alpha$ (vgl. II, 1 in **26**) so klein, daß sie vernachlässigt werden kann, so wird man im allgemeinen diejenige Schaltung wählen, bei welcher diese vernachlässigbar kleine Korrektion vorliegt, also für die Messung der Konsumstellenleistung bei verhältnismäßig kleinen Stromstärken $\tilde{J}_H$ und hohen Spannungen $\tilde{E}_k$ die Schaltung nach Fig. 134, hingegen bei großen Stromstärken $\tilde{J}_H$ und niederen Spannungen $\tilde{E}_k$ die Schaltung nach Fig. 135. Weiterhin bleibt noch zu beachten, daß man, wie bei den Figuren 134 und 135 strichliert angedeutet, fast stets noch ein Amperemeter zur Messung von $\tilde{J}_H$ und ein Voltmeter zur Bestimmung von $\tilde{E}_{Sp}$ bzw. $\tilde{E}_k$ der Meßschaltung einfügen wird, teils wegen genauerer Ermittelung des Wertes jener beiden Wattmeterkorrektionen, teils wegen Feststellung des Leistungsfaktors $\cos\varphi = \frac{\tilde{W}}{\tilde{E}_k \cdot \tilde{J}_H}$, sowie überhaupt der Ausgleichverhältnisse. Wählt man hierbei die in Fig. 134 bzw. Fig. 135 angedeutete Schaltung für Amperemeter und Voltmeter, so bleibt die obige Fassung für die Anbringung der Wattmeterkorrektionen ungeändert, nur ist zu beachten, daß bei der Hauptstromkreiskorrektion das R_H außer dem Widerstand $R_{1,2}$ der Hauptstromspule des Wattmeter noch den Amperemeterwiderstand $R_{2,3}$ in Reihenschaltung umfaßt, während bei der Spannungskreiskorrektion $\tilde{J}_{Sp}$ die Summe der Spannungsspulenstromstärke und der Voltmeterstromstärke ist, bzw. R_{Sp} den Parallelschaltungswert der Widerstände beider darstellt.

Die graphische Behandlung der Schaltungskorrektionen für die 4 möglichen Schaltungskombinationen von Wattmeter, Voltmeter und Amperemeter zeigen die Fig. 136 a bis d, die sich an die Ausführungen bei Fig. 36 in **18** anschließen. Sie erklären sich nach dem Vorstehenden von selbst, wenn

man beachtet, daß der Index w die vom Wattmeter gemessenen, der Index c die korrigierten Größen kennzeichnet, der Index g sich auf den Generator bezieht, h auf die Hauptstromspule, V auf das Voltmeter, A auf das Amperemeter, N auf die Spannungsspule des Wattmeters und daß K die Konsumstelle bezeichnet, deren Leistungsaufnahme bestimmt werden soll.

Nimmt man an, daß für gewöhnlich die von einer Konsumstelle aufgenommene Leistung gemessen werden soll, so ist es möglich unter Be-

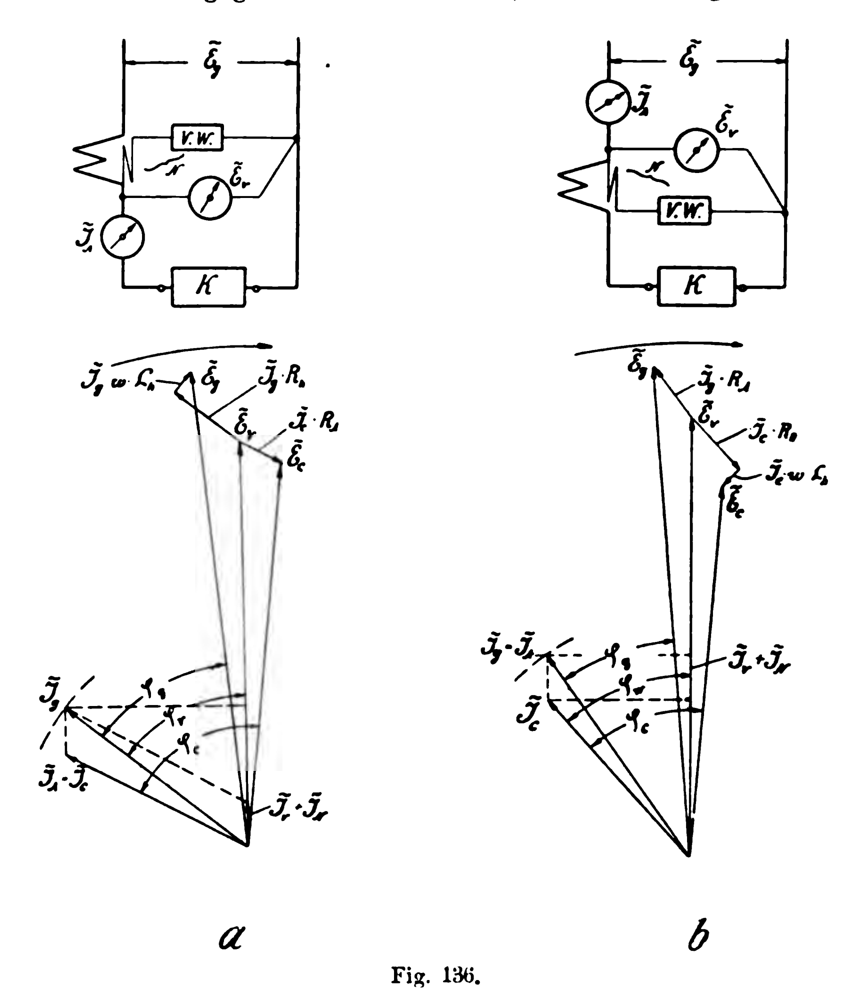


Fig. 136.

nutzung der Schaltung von Fig. 135 die Korrektion des Spannungsspulenkreises durch Kompensation selbsttätig durch das direktzeigende Wattmeter vornehmen zu lassen, indem man $\tilde{J}_{sp}$ nicht unmittelbar durch die bewegliche Spannungsspule leitet, sondern vorher eine feststehende Kompensationsspule durchfließen läßt, deren Feld entgegen dem Feld der Hauptstromspule gerichtet ist und dieses um so viel schwächt, als $\tilde{J}_{sp} \cdot \tilde{E}_{sp}$ entspricht. Näheres hierüber siehe in Abt. 5 dieses Bandes.

64. Phasenverschiebungskorrektion. Neben diesen Schaltungskorrektionen, welche durch die Eigenwiderstände bzw. den Eigenverbrauch der Meßapparate bedingt werden und namentlich bei der Messung kleiner Leistungen sehr zu beachten sind, wenn erhebliche Fehler des Ergebnisses in einzelnen Fällen vermieden werden

sollen, besteht noch die Phasenverschiebungskorrektion bei allen Wattmeterbestimmungen. Diese Korrektion wird durch den Umstand bedingt, daß die Wattmeterangabe in erster Linie ein Maß ist für die Größe und Phasenverschiebung zweier Stromstärken, nämlich $\tilde{J}_H$ und $\tilde{J}_{Sp}$, sowie von deren Phasenverschiebung $\cos(\tilde{J}_H, \tilde{J}_{Sp})$ abhängt (siehe ausführlicher in II, 1 in **26**). Ist nun die stillschweigende Voraussetzung, daß

$$\tilde{J}_{Sp} = \tilde{E} : R_{Sp} \quad \text{und} \quad \cos(\tilde{J}_H, \tilde{J}_{Sp}) = \cos(\tilde{J}_H, \tilde{E})$$

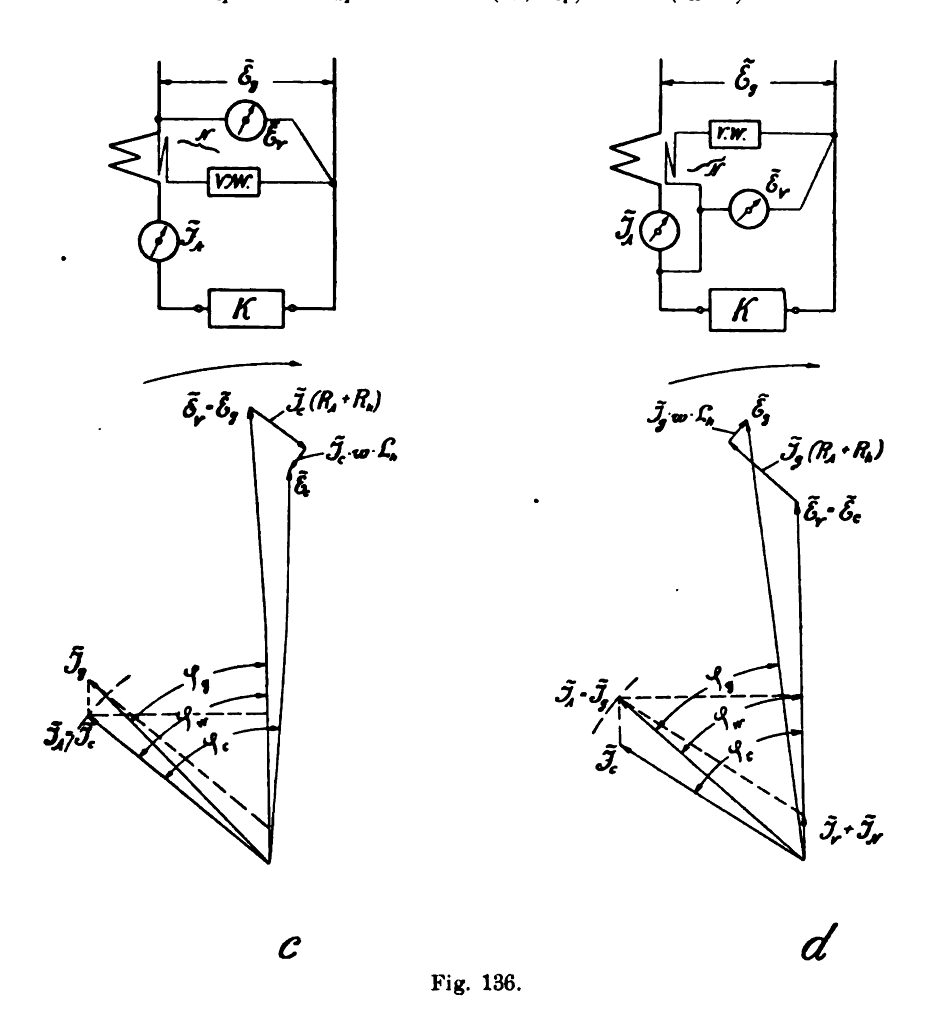


Fig. 136.

nicht ausreichend genau erfüllt, so bedarf die Angabe des Wattmeters einer Korrektion in Gestalt eines Korrektionsfaktors F, der die abgelesenen Watt auf die wahren Watt reduziert. Unter Umständen, namentlich bei sehr großen Phasenverschiebungen also kleinen Leistungen, kann dieser Korrektionsfaktor so große Abweichungen von 1 aufweisen, daß eine Nichtberücksichtigung außerordentliche prozentuale Fehlerbeträge zur Folge haben kann. Bei der gebräuchlichen Annahme, daß der Spannungsspulenkreis, d. i. der Vorschaltwiderstand R_v der Spannungsspule einschließlich der Spannungsspule selbst, stets eine, wenn auch kleine resultierende Selbstinduktion L_{Sp} aufweist, wird meist nur die Fassung des Korrektionsfaktors F für die Ver-

zögerung δ von $\tilde{J}_{sp}$ gegenüber $\tilde{E}$ angegeben (siehe u. a. DANIELSON, ETZ 1892, 448). In diesem Fall nimmt der Faktor F, wie sich aus Fig. 137a ableiten läßt, die Form an (II, 1 in **26**)

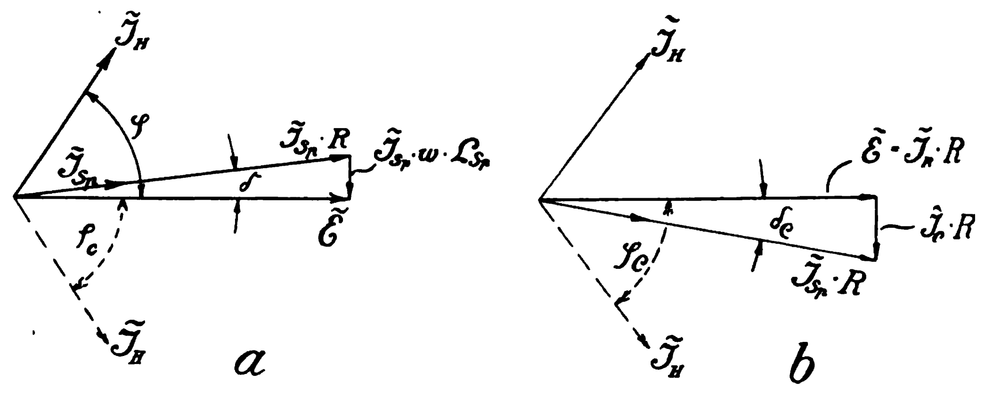


Fig. 137.

$$F = \frac{\cos\varphi}{\cos\delta\cdot\cos(\varphi\mp\delta)} = \frac{1+\operatorname{tg}^2\delta}{1\pm\operatorname{tg}\varphi\cdot\operatorname{tg}\delta}.$$

Diese Fassung läßt ohne weiteres erkennen, daß für eine Verzögerung φ von $\tilde{J}_H$ gegenüber $\tilde{E}$ und $\varphi > \frac{\delta}{2}$ die Angabe des Wattmeters zu groß wird, also F kleiner als 1 sein muß, da die Angabe des Wattmeters

$$C\cdot\alpha\cdot R = \tilde{J}_H\cdot\tilde{J}_{sp}\cdot R\cdot\cos(\varphi-\delta)$$

beträgt, hingegen die wahre Leistung

$$W = \tilde{J}_H\cdot\tilde{E}\cdot\cos\varphi = C\cdot\alpha\cdot\frac{R\cdot\cos\varphi}{\cos\delta\cdot\cos(\varphi-\delta)}.$$

Eilt hingegen $\tilde{J}_H$ dem $\tilde{E}$ um φ_c voraus, so ist die Angabe des Wattmeters

$$C\cdot\alpha\cdot R = \tilde{J}_H\cdot\tilde{J}_{sp}\cdot R\cdot(\cos\varphi_c+\delta)$$

zu klein gegenüber der wahren Leistung, somit der Korrektionsfaktor

$$F = \frac{\cos\varphi_c}{\cos\delta\cdot(\cos\varphi_c+\delta)} = \frac{1+\operatorname{tg}^2\delta}{1-\operatorname{tg}\varphi_c\cdot\operatorname{tg}\delta}$$

größer als 1.

Nach meinen Untersuchungen an Bifilarwiderständen (vgl. **35**, sowie II, 1 in **16**), wie sie meistens als Vorschaltwiderstände R_r für die Spannungsspule verwendet werden, ist aber deren resultierende Kapazität C_r (Fig. 138) so erheblich, daß auch der kleine Selbstinduktionskoeffizient, welchen die Spannungsspule naturgemäß besitzen muß, durch jene weit übertroffen wird und noch eine merkliche resultierende Voreilung δ_C von $\tilde{J}_{Sp}$ gegenüber der Meßspannung $\tilde{E}$ die Folge zu sein pflegt. Wie Fig. 137b erkennen läßt, ist in diesem Falle die Angabe des Wattmeters für die Verzögerung φ von $\tilde{J}_H$

$$C\cdot\alpha\cdot R = \tilde{J}_H\cdot\tilde{J}_{Sp}\cdot R\cdot\cos(\varphi+\delta_C) = \tilde{J}_H\cdot\frac{\tilde{E}}{\cos\delta_C}\cdot\cos(\varphi+\delta_C).$$

Der Korrektionsfaktor zur Reduzierung dieser Angabe auf den wahren Wert wird sonach bei Voreilung des Spannungsspulenstromes um δ_C

$$F_C = \frac{\cos\varphi \cdot \cos\delta_C}{\cos(\varphi \pm \delta_C)}.$$

Das untere Vorzeichen vor δ_C, also die Differenz von φ und δ_C anstelle der Summe, würde hierbei in Frage kommen, wenn $\tilde{J}_H$ gegenüber $\tilde{E}$ voreilen würde, wie dies in Fig. 137b durch φ_C strichliert angedeutet ist.

Über die Möglichkeit, δ durch Einfügung von Kapazität bzw. Selbstinduktion in den Spannungsspulenkreis zu beeinflussen und gegebenenfalls zu kompensieren siehe in **121**.

Diese Phasenverschiebungskorrektion käme weiterhin in allen den Fällen in Frage, in welchen die Stromstärke $\tilde{J}_h$ der feststehenden Spule nicht mit der Stromstärke $\tilde{J}_H$ des Hauptkreises identisch ist, wie bisher angenommen,

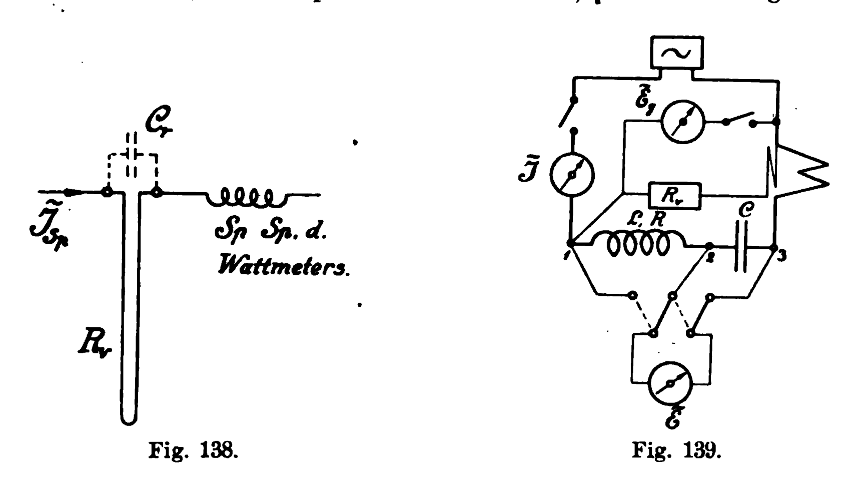


Fig. 138. Fig. 139.

sondern entweder durch Abzweigung von einem Normalwiderstand als Nebenschluß, wie bei den Spiegelwattmetern (vgl. II, 1 in **90**), oder auch durch Transformation mit Hilfe eines Transformators (vgl. **7**) erhalten worden ist. In beiden Fällen würde es einer besonderen Überlegung und Untersuchung bedürfen, welcher Phasenverschiebungsbetrag δ_h zwischen $\tilde{J}_h$ und $\tilde{J}_H$ durch jene Verzweigung oder Zwischenschaltung bewirkt wird, um nach Feststellung ihrer Richtung und Größe darüber entscheiden zu können, ob δ_h vernachlässigbar klein ist, oder wie der Korrektionsfaktor F hierdurch beeinflußt, d. h. durch entsprechende Korrektion des Wertes φ um δ_h richtig gestellt wird.

Ist die Phasenverschiebung φ zwischen Spannung $\tilde{E}$ und Stromstärke $\tilde{J}$ sehr groß, der Leistungsfaktor $\cos\varphi$ also sehr klein, wie dies namentlich bei der Untersuchung des Wattverbrauchs von überwiegend kapazitiven Stromkreisteilen, etwa unbelasteten Hochspannungskabeln, der Fall ist, so versagt praktisch die Wattmetermethode in ihrer gewöhnlichen Form aus zwei Gründen: Einmal werden die zur Untersuchung erforderlichen Spannungen und damit wegen des erforderlichen Vorschaltwiderstandes die Wattmeterkonstanten C_W (II, 1 in **26**) so groß, daß es sich nur um winzige Ausschläge handelt. Ein zweites Mal wird der Korrektionsfaktor infolge Phasenverschiebung so erheblich, daß die Messung schon dadurch sehr unsicher würde, in Verbindung mit den winzigen Ausschlägen aber völlig unbrauchbar wird.

Durch einen Kunstgriff kann man aber beide Schwierigkeiten gleichzeitig überwinden. Benutzt man nämlich die in Fig. 139 angedeutete Resonanzschaltung, wie sie zuerst vom Verfasser (vgl. ETZ 1897, 63 Fig. 14; ferner 1899, 200) und später auch von ROSA und SMITH (vgl. ETZ 1899, 149) angegeben wurde, d. h. schaltet man in Reihe mit der zu untersuchenden Kapazität C eine Selbstinduktion (Drosselspule), deren Wert L etwa der Gleichung $L = \frac{1}{\omega^2 \cdot C}$ entspricht (siehe hierzu in **11**), so mißt das Wattmeter die gesamte verlorene Leistung $\tilde{W}$ in L und C unter günstigen Bedingungen, weil die Summenspannung $\tilde{E}_G$ verhältnismäßig klein und damit in Zusammenhang der Leistungsfaktor der zugeführten Leistung verhältnismäßig groß gewählt werden kann. Wird hierauf die in L verlorene Leistung $\tilde{W}_L$ gesondert bestimmt, was etwa nach Art der Verlustbestimmungen an Transformatoren (**107**) erfolgen kann und meist ausreichend genau ausführbar ist, so läßt sich die im Kabel verlorene Leistung $\tilde{W}_C$ als Differenz zu

$$\tilde{W}_C = \tilde{W} - \tilde{W}_L$$

bestimmen. Bemerkt sei nur, daß die a. a. O. gezogenen Schlüsse (siehe hierzu auch I, 1 in **126**) aus dem Grunde zweifelhaft sind, weil die Bestimmung von $\tilde{W}_L$ teilweise durch Extrapolation erfolgte, namentlich aber weil für die Phasenkorrektion der Wattmetermessung die damals noch allgemein gemachte Annahme über den resultierenden Nebenkoeffizienten der Wattmetervorschaltwiderstände benutzt wurde, die neuere Untersuchungen (II, 1 in **16**) als unzutreffend erwiesen haben. Über Wattmeter-Nullmethoden siehe in **74** und **121**.

Auf die Beeinflussung der Wattmeterangaben durch die Verschiedenheit der Kurvenform oder der höheren Harmonischen bei Stromstärke und Spannung, oder genauer durch die Abweichung der Phasenverschiebung je zweier Harmonischen von der Phasenverschiebung der Grundschwingungen soll weiter unten (**73**) beim Leistungsfaktor bzw. Imparitätsfaktor eingegangen werden.

65. Hitzdrahtwattmeter. Neben den auf Dynamometerprinzip beruhenden Wattmetern, welche bisher fast ausschließlich in Anwendung sind, ist auch die Zusammenwirkung eines Hitzdrahtvoltmeters zur Messung von e und eines Hitzdrahtamperemeters zur Messung des zugehörigen i in Vorschlag gebracht worden (siehe hierüber BAUCH, ETZ 1903, 530). Aus der Vereinigung der Summen- und der Differenzwirkung beider auf Grund der Beziehung

$$(i + e)^2 - (i - e)^2 = 4\, i \cdot e$$

wird der vierfache Betrag jeder Augenblicksleistung $i \cdot e$ zur Anzeige gebracht und die endgültig umgesetzte Leistung $\tilde{J} \cdot \tilde{E} \cdot \cos\varphi$ durch selbsttätige Integration aller Augenblickswerte auf Grund der Trägheit des Instrumentes zur Anzeige gebracht. Über eine Ausführung dieser Hitzdrahtwattmeter siehe weiteres in Abteilung 5 dieses Bandes.

66. Leistung aus 3 Spannungen. Die Ermittelung der elektrischen Leistung mit Hilfe mehrerer Spannungs- oder Strommessungen steht zwar an Einfachheit hinter der Wattmetermessung zurück, besitzt aber in gewissen Fällen eine durch die Wattmetermethode vorläufig nicht ersetzbare Bedeutung. Namentlich die Leistungsmessung mit Hilfe dreier Spannungswerte bietet in allen Fällen, die eine dynamometrische Messung wegen der Kleinheit der Leistungen bzw. Stromstärken nicht als durchführbar erscheinen lassen, die letzte Zuflucht des Meßtechnikers und

erlaubt bei Benutzung elektrostatischer Spannungszeiger noch die Ermittelung sehr kleiner Leistungsbeträge.

Die Ableitung der umgesetzten Leistung aus 3 zusammengehörigen Spannungswerten besitzt bei den verschiedenen Ausführungen der Meßanordnung — der sog. 3 Voltmetermethoden mit gleichzeitiger Messung der 3 Spannungen, der nacheinanderfolgenden Messung der 3 Spannungen mit Hilfe eines elektrostatischen Voltmeters bzw. Elektrometers (Potier) und endlich der Vereinigung der 3 Spannungswerte durch eine besondere Elektrometerschaltung zu einem einheitlichen Ausschlag in dem sog. elektrostatischen Wattmeter (Blondlot und Curie) — stets dieselbe Grundlage: Bezeichnet e für irgend einen beliebigen Augenblick die Spannung zwischen 2 und 3 (Fig. 140a), d. h. an den Enden der Leiterkreisstrecke, deren Leistungsverbrauch ermittelt werden soll, ferner e_r in demselben Augenblick die Spannung an den Enden eines reinen Ohmschen Widerstandes R (ohne Nebenkoeffizienten vgl. 64) von passender Größe, e_s die Summenspannung

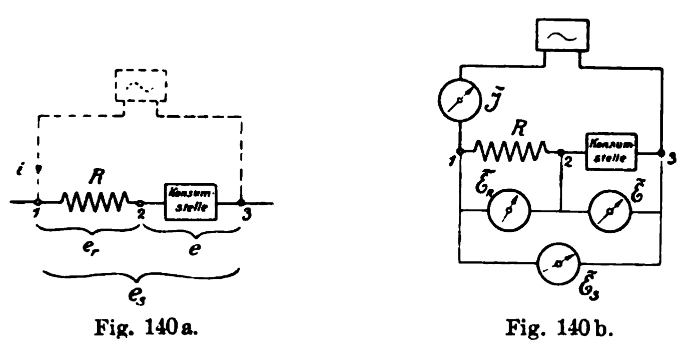


Fig. 140a. Fig. 140b.

zwischen Punkt 1 und 3, sowie i die beiden Strecken gemeinschaftliche Augenblicksstromstärke, so muß ganz allgemein, d. h. für jede beliebige Kurvenform und Phasenverschiebung die Beziehung bestehen

$$e_s = e + e_r$$

und ferner

$$e_s^2 - e_r^2 - e^2 = 2\,e \cdot e_r = 2\,e \cdot i \cdot R$$

$$e \cdot i = \frac{e_s^2 - e_r^2 - e^2}{2\,R}.$$

Die Integration über eine Periode mit der Zeitdauer T liefert

$$\frac{1}{T}\int_0^T e \cdot i \cdot dt = \frac{1}{2\,R \cdot T}\int_0^T (e_s^2\,dt - e_r^2 \cdot dt - e^2\,dt),$$

also auf der linken Seite die gesuchte umgesetzte Leistung $\tilde{W}$, auf der rechten — bei der selbsttätigen Integration der mit Trägheit begabten Wechselspannungszeiger — die Quadrate der wirksamen (effektiven) Spannungen, nämlich

$$\frac{1}{2\,R}\left(\tilde{E}_s^2 - \tilde{E}_r^2 - \tilde{E}^2\right),$$

so daß die Leistungsmessung in der Gleichung

$$\tilde{W} = \frac{1}{2\,R}\left(\tilde{E}_s^2 - \tilde{E}_r^2 - \tilde{E}^2\right)$$

auf die Messung dreier Spannungswerte und eines Hilfswiderstandes R zurückgeführt ist. Da aus der Spannung $\tilde{E}_r$ auch die Stromstärke $\tilde{J}$ zu $\tilde{E}_r : R$ folgt, so ergibt sich weiterhin der Leistungsfaktor ($\cos\varphi$) für die Strecke 2, 3 zu

$$\cos\varphi = \frac{\tilde{E}_s^2 - \tilde{E}_r^2 - \tilde{E}^2}{2\,R \cdot \tilde{E} \cdot \tilde{J}} = \frac{\tilde{E}_s^2 - \tilde{E}_r^2 - \tilde{E}^2}{2\,\tilde{E} \cdot \tilde{E}_r}.$$

Die Unterscheidung zwischen Leistungsfaktor $\cos\varphi$ und der Phasenverschiebung φ_0 ist in **73** behandelt.

Um bei der Ausführung den Einfluß der Beobachtungsfehler auf das Meßergebnis möglichst klein zu machen (II, 1 in 7), sowie größere Korrektionen oder Fehler durch die Reaktion der Meßschaltung zu vermeiden, ist auf folgende Punkte zu achten:

Bei allen Anwendungen der Spannungsmethode ist darauf zu sehen, daß R ohne Nebenkoeffizienten (vgl. oben), genau in Ω bekannt ist und von passender Größe gewählt wird. Diese ist meßtechnisch am günstigsten, wenn $\tilde{E}_r$ etwa gleich $\tilde{E}$, und zwar gilt dies unabhängig von der Phasenverschiebung. Dort, wo auf den verfügbaren günstigen Meßbereich des bzw. der benutzten Instrumente Rücksicht zu nehmen ist, muß man wenigstens darauf Bedacht nehmen, daß die Abweichung von der Gleichheit nicht zu groß wird, weil sonst bei größeren Werten von $\cos\varphi$ die prozentuale Zuverlässigkeit des Endwertes zu gering wird. Die Bedingung der angenäherten Gleichheit von $\tilde{E}_r$ und $\tilde{E}$ läßt auch sogleich erkennen, daß die im Hilfswiderstand R verbrauchte Leistung $\tilde{W}_R$ mindestens ebenso groß ist wie die zu messende Leistung ($\tilde{W}$) an der Verbrauchsstelle, unter Umständen aber das Mehrfache von $\tilde{W}$ betragen kann; ebenso muß die verfügbare Spannung $\tilde{E}_s$ zwischen 1·4 bis 2 $\tilde{E}$ betragen. Beides läßt die Methode zur Messung größerer Leistungen, wie sie in der Starkstromtechnik vorliegen, wenig geeignet erscheinen, um so mehr aber für sehr kleine Leistungen der Schwachstromtechnik, wo jene Opfer an Leistung und Spannung nur zum Zwecke der Messung keine Schwierigkeiten bereiten.

Die Ausführung der Messung nach der 3-Voltmetermethode, bei welcher die Schaltung der Fig. 140 b benutzt wird, sonach die 3 erforderlichen Spannungen durch gleichzeitige Ablesung an 3 gesonderten Instrumenten gemessen werden, bedingt neben der Voraussetzung einer guten Zusammeneichung der 3 Voltmeter noch die Beachtung folgender Punkte: Werden nicht 3 elektrostatische Voltmeter mit vernachlässigbarem Ladestrom verwendet, sondern stromverbrauchende Instrumente, so ist, abgesehen von der erforderlichen Korrektion an der Stromstärke $\tilde{J}$ für die Leistungsmessung, für $R_{1,2}$ der Verzweigungswiderstand aus R und dem Voltmeterwiderstand für $\tilde{E}_R$ einzusetzen und außerdem darauf zu sehen, daß der Selbstinduktionskoeffizient des letzteren klein genug ist, um vernachlässigt werden zu können; ferner ist von der so ermittelten Leistung für die Leiterstrecke 2, 3 der Wattverbrauch für das Voltmeter zur Messung von $\tilde{E}$ abzuziehen, um den gesuchten Wert zu erhalten. Diese Bedingungen lassen übrigens erkennen, daß die Ausführung mit 3 stromverbrauchenden Voltmetern praktisch kaum in Frage kommt, da man bei größeren Leistungen $\tilde{W}_{2,3}$, wo jene Korrektionen nicht oder nur wenig ins Gewicht fallen, wohl stets die Wattmetermethode vorziehen wird (aus den oben angeführten Gründen), während man bei sehr kleinen Leistungen, d. h. dem eigentlichsten Anwendungsgebiet der Spannungsmethode, wegen des zu großen oder gar

überwiegenden Betrages jener Korrektionen aus meßtechnischen Gründen davon absehen wird. Um so wichtiger ist für die letztgenannten Fälle diese Laboratoriumsmethode unter Benutzung von elektrostatischen Instrumenten.

Da man aber oft nicht in der Lage sein wird, 3 passende elektrostatische Voltmeter zu besitzen, so wird die Methode wohl meist mit aufeinanderfolgender Messung der 3 Spannungen verwendet, am besten unter Benutzung eines Fünfschalters nach Fig. 141 (siehe hierzu auch in **16** und **33**). Allerdings setzt dies voraus, daß es möglich ist, die elektrischen Ausgleichverhältnisse während der für alle 3 Messungen erforderlichen Zeit stationär zu erhalten, doch pflegt dies bei kleinen Leistungen keine zu großen Schwierigkeiten zu machen; immerhin ist eine Kontrolle durch nochmalige Messung der ersten bzw. der Gesamtspannung angezeigt. Als Meßinstrument

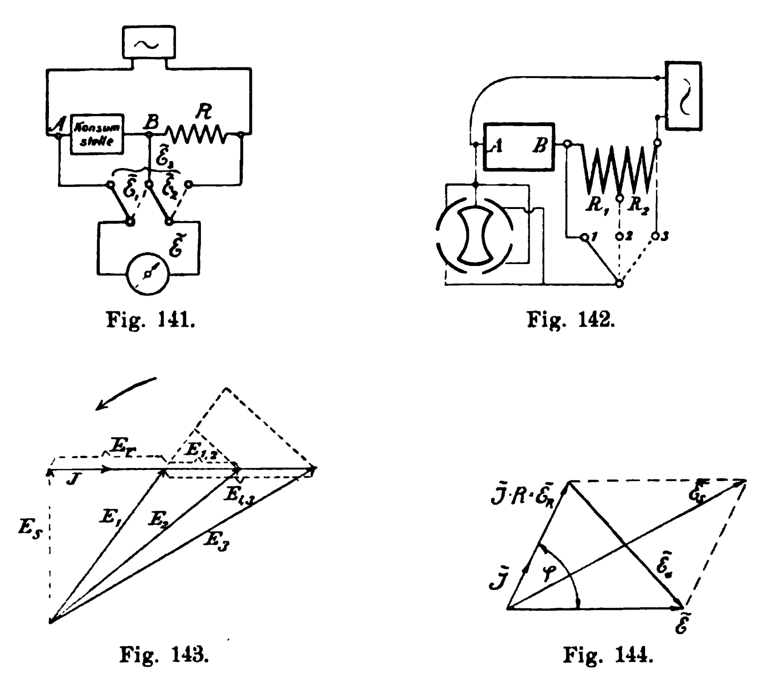


Fig. 141. Fig. 142.

Fig. 143. Fig. 144.

für $\tilde{E}$ eignet sich ein direktzeigendes Multizellularvoltmeter (vgl. Abteilung 5), doch muß man alsdann darauf achten, daß alle 3 Ablesungen in den günstigen Meßbereich fallen, was sich aber durch passende Wahl von R — nötigenfalls durch Vereinigung und Parallelschaltung verschiedener verfügbarer Widerstandssätze — stets erreichen läßt. Über ein Zahlenbeispiel siehe in **33** gegen Schluß.

Natürlich kann aber auch ein zuverlässig geeichtes Quadrantenelektrometer (vgl. **2**) für die Messung Verwendung finden. Für ein solches bestehen noch zwei weitere Abänderungen der Spannungsmethode zur Leistungsmessung. Die ältere dieser Methoden, welche als Methode von Potier bezeichnet zu werden pflegt, beruht auf der Benutzung eines zweiteiligen Widerstandes R_1 und R_2 in der Schaltung nach Fig. 142 und Messung der 3 Spannungen $\tilde{E}_1$, $\tilde{E}_2$ und $\tilde{E}_3$ (vgl. Fig. 143), wobei nur die eine Spannungsleitung umgeschaltet und nacheinander an die Kontakte 1, 2 und 3 (Fig. 142) gelegt wird, so daß bei reinem Ohmschen Widerstand für R_1 und R_2 sich das in Fig. 143 angegebene Kreisdiagramm für die

gegenseitige Lage der Spannungsvektoren ergibt, wenn die zu messende Konsumstelle AB eine Phasenverschiebung zwischen $\bar{E}_1$ und $\bar{J}$ aufweist, mit der Komponente $\bar{E}_r$ als arbeitleistender und $\bar{E}_s$ als wattloser Komponente zur Überwindung der Selbstinduktion. Abgesehen davon, daß die Beziehung zwischen der gesuchten Leistung W_{AB} und den gemessenen Größen verwickelter ausfällt als bei Messung nach Fig. 141, nämlich nach Fig. 143 zu

$$W_{AB} = \frac{\bar{E}_3^2 \cdot R_1^2 - \bar{E}_1^2 R_1^2 - (\bar{E}_2^2 - \bar{E}_1^2)(R_1 + R_2)^2}{2(R_1 \cdot R_2^2 + R_1^2 \cdot R_2)},$$

so ist auch vom meßtechnischen Standpunkt aus diese Form der Spannungsmethode ungünstiger, weil der Einfluß der Meßfehler auf das Endresultat größer ist als bei der Schaltung nach Fig. 141 unter geeigneter Wahl von R.

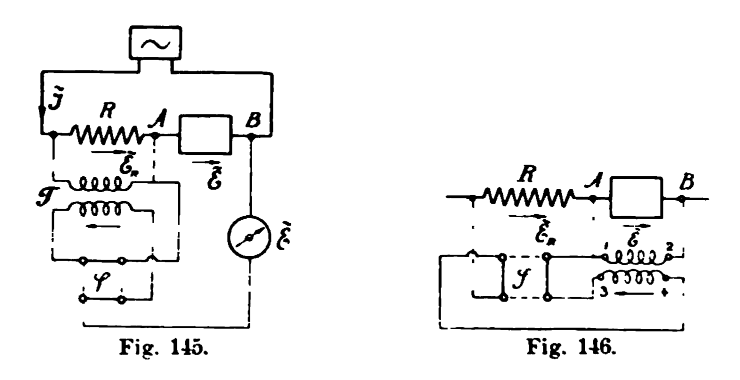


Fig. 145. Fig. 146.

67. Leistung aus 2 Spannungen. Wichtiger ist die Überführung der Spannungsmethode aus der Messung der 3 unmittelbar gegebenen Spannungen in eine Meßmethode mit nur 2 Spannungsmessungen unter Benutzung der geometrischen Summe $\bar{E}_s$ und Differenz $\bar{E}_d$ der Spannungen $\bar{E}$ und $\bar{E}_R$ in Fig. 144 auf Grund folgender Beziehungen: Die zu messende Leistung W kann man schreiben

$$W = \bar{E} \cdot \bar{J} \cdot \cos\varphi = \frac{1}{R} \cdot \bar{E} \cdot \bar{E}_R \cdot \cos\varphi.$$

Aus der goniometrischen Beziehung, nach welcher

$$\bar{E}_s^2 = \bar{E}^2 + \bar{E}_R^2 + 2\,\bar{E} \cdot \bar{E}_R \cdot \cos\varphi \quad \text{und}$$

$$\bar{E}_d^2 = \bar{E}^2 + \bar{E}_R^2 - 2\,\bar{E} \cdot \bar{E}_R \cdot \cos\varphi, \quad \text{also}$$

$$4\,\bar{E} \cdot \bar{E}_R \cdot \cos\varphi = \bar{E}_s^2 - \bar{E}_d^2 \quad \text{folgt sonach, daß}$$

$$4\,R \cdot W = \bar{E}_s^2 - \bar{E}_d^2 \quad \text{oder} \quad W = \frac{\bar{E}_s^2 - E_d^2}{4\,R}.$$

Die Ausführung der Messung von $\bar{E}_s$ und $\bar{E}_d$ kann auf zwei Arten erfolgen. Nach einem Vorschlag von A. Campbell (siehe Electrician 1901 vom 7. Juni Seite 256) kann man nach der Schaltung der Fig. 145 einen kleinen Transformator T an die Klemmen von R legen und mit Hilfe des Stromwenders S in der einen Stellung (ausgezogen) die Summenspannung $\bar{E}_s$, in der anderen (strichliert) die Differenzspannung $\bar{E}_d$ mit einem gewöhnlichen Spannungszeiger bzw. Elektrometer messen. Nach einem Vorschlage von Breslauer (siehe Z. f. El. 1902, 53, oder auch ETZ 1902, 72) würde man zur Messung

von $\tilde{E}_s$ und $\tilde{E}_d$ ein „Differentialvoltmeter" benutzen, das als Weicheiseninstrument mit zwei gleichen, durch bifilare Aufwickelung erhaltenen Erregerwickelungen zu denken ist, deren 4 Enden 1, 2, 3, 4 nach Fig. 146 zu schalten wären, um bei der einen Stellung von S (ausgezogen) die Summenspannung $\tilde{E}_s$, nach der anderen (strichliert) die Differenzspannung $\tilde{E}_d$ zu erhalten. Beide Schaltungen sind namentlich für größere Phasenverschiebungen φ zwischen A und B und verhältnismäßig große Werte von $\tilde{J}$ gedacht, um von umständlichen Korrektionen wegen des Stromverbrauches von Transformator bzw. Voltmeter absehen zu können.

68. Leistung mit elektrostatischem Wattmeter.

Ist es für die gegebenen Verhältnisse von Bedeutung, die Leistung durch die Ablesung nur eines Instrumentes mit vernachlässigbarem Eigenverbrauch an Strom und Leistung ermitteln zu können, so bietet hierfür das sogenannte elektrostatische Wattmeter die Möglichkeit. Es ist dies die Benutzung eines Quadrantenelektrometers in einer besonderen Schaltung, die eine Vereinigung der in 60 angegebenen indirekten Stromstärkemessung mit einer Messung der zugehörigen Spannung darstellt, so zwar, daß der Ausschlag, ähnlich wie bei dem dynamometrischen Wattmeter, ein gleichzeitiges Maß für $i \cdot e$ und bei selbsttätiger Integration infolge der Trägheit des Zeigersystems für

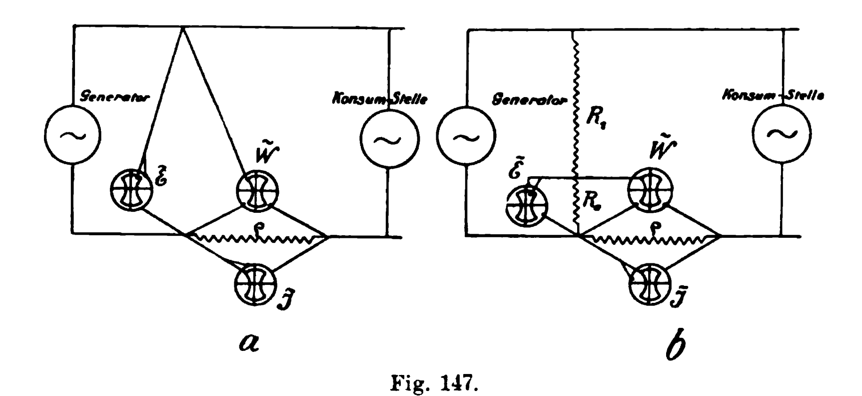


Fig. 147.

$\tilde{J} \cdot \tilde{E} \cdot \cos\varphi$ liefert. Bei der gleichzeitigen Benutzung zweier weiterer elektrostatischer Instrumente, eins für die indirekte Stromstärkebestimmung als Amperemeter geschaltet, das andere als Voltmeter, zeigt Fig. 147 a die Schaltung aller 3 elektrostatischen Instrumente für Niederspannungskreise, Fig. 147 b diejenige für Hochspannungskreise (vgl. L'écl. el. Bd. XXVIII, 285). Im letzteren Falle müssen die aus der Eichtabelle entnommenen Watt noch mit dem Verhältnis $R_1 : R_2$ multipliziert werden. Für zuverlässige Messungen muß nämlich die Eichung des als Wattmeter benutzten Instrumentes empirisch über den ganzen Skalenbereich erfolgen.

Abgesehen von den Empfindlichkeitsbeschränkungen und von den Anforderungen an den induktionsfreien Widerstand ϱ zur indirekten Stromstärkemessung, der zwischen seinen Enden mindestens 1 Volt Spannung aufweisen muß, ist übrigens eine einwandfreie Messung der Leistung mit Hilfe eines Elektrometers auf Grund der Ausführungen in 2 doch nicht so einfach, wie aus den soeben angeführten Schaltungsanordnungen zu folgen scheint, ebensowenig wie eine einzige Ablesung zu ihrer Bestimmung genügt. Nach den Untersuchungen von Orlich (siehe in 2) würde

man zur Prüfung eines Wattmeters oder Wechselstromzählers die in Fig. 148a angegebene Schaltung zu wählen haben, wobei eine Leitung die Gehäuseklemme G des Kommutators I mit einer Quadrantenklemme Q_1 von II verbindet und die wahre Wechselstromleistung $\tilde{W} = \frac{1}{T}\int_0^T e \cdot i \cdot dt = \tilde{E} \cdot \tilde{J} \cdot \cos\varphi$ durch die Beziehung

$$\tilde{W} = \frac{1 + \mathfrak{A} \cdot \tilde{E}^2}{2\, b_2 \cdot \varrho}(\alpha - \beta)$$

zur Messung gelangt, wenn $\mathfrak{A}$ und b_2 zwei vorher mit Gleichspannung ermittelte Elektrometerkonstanten sind (vgl. in 2), während α und β die zwei Ablesungen (rechts und links) sind, welche beim Kommutieren von I erhalten werden.

Auch hier kann man, ähnlich wie in 2, die Bestimmung der Elektrometerkonstanten mit Hilfe der in Fig. 148b angegebenen Schaltung für die Nullmethode zur Messung der Leistung $\tilde{W}$ vermeiden, braucht aber immerhin zwei Ablesungen. Bedeutet in Fig. 148b $\bar{E}_B$ die Gleichspannung

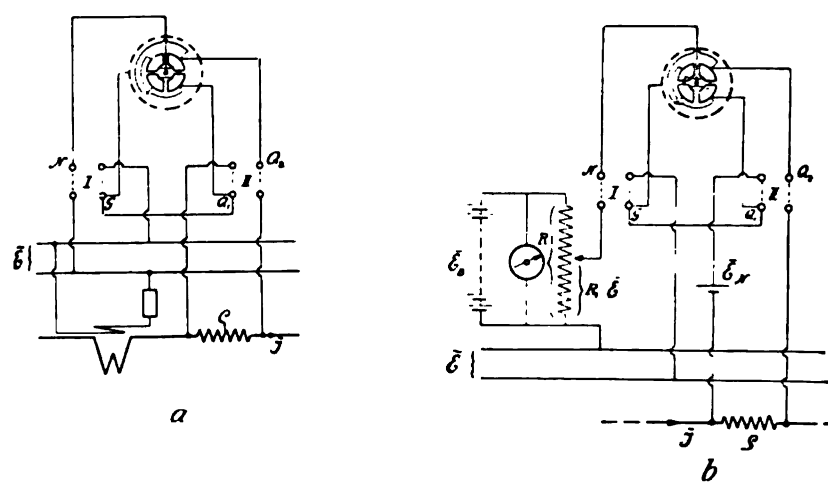


Fig. 148.

einer Batterie, ferner $\bar{E}_N$ die Spannung eines dauernd eingeschalteten Normalelements, so reguliert man zunächst die Teilspannung $\bar{E}$ auf den Wert $\bar{E}_1$ ein, welcher den Ausschlag $(\alpha - \beta)$ beim Kommutieren von I zu Null macht (vgl. hierzu Fig. 2b in 2), hierauf erhält II seine zweite Stellung und $\bar{E}$ wird in gleicher Weise auf den Wert $\bar{E}_2$ einreguliert. Alsdann ist

$$\tilde{W} = \frac{1}{2}\,\frac{(\bar{E}_1 + \bar{E}_2) \cdot \bar{E}_N}{\varrho}.$$

Anstelle der in Fig. 147 angedeuteten Schaltung, unter Benutzung der üblichen Quadrantenelektrometer mit zwei voneinander isolierten Quadrantenpaaren und einer Nadel, kann man auch nach Blondlot und Curie (Journal de Physique 1889, 80) ein besonders gebautes Elektrometer mit nur einem Paar von feststehenden Belegungen und zwei voneinander isolierten.

aber mechanisch miteinander verbundenen Nadeln verwenden, wie Fig. 149 andeutet. Auch hier muß die Eichung empirisch mit Gleichstromleistung erfolgen.

Über die weitere Verwendung eines Elektrometers nicht nur zur Messung der Leistung, sondern nebenbei auch der Stromstärke und des Phasenverschiebungswinkels unter Benutzung eines Synchronmotors siehe Hohage (ETZ 1902, 365 oder S.E.V. Bd. IV Heft 7), da diese etwas umständliche Meßanordnung wohl nur in selteneren Fällen zur Anwendung gelangen dürfte.



Bei den vorstehenden Spannungsmethoden ist die Messung der Leistung $\tilde{W} = \tilde{E} \cdot \tilde{J} \cdot \cos\varphi$ dadurch erfolgt, daß die beiden übrigen Faktoren der rechten Seite, nämlich $\tilde{J}$ und $\cos\varphi$ gleichfalls (indirekt) aus Spannungsmessungen sich ergeben. Anstatt so den Ausdruck für die Leistung auf einen konstanten Hilfswiderstand und 3 mit der Leistung veränderliche Spannungswerte zurückzuführen (**66**), kann man auch 3 mit der Leistung veränderliche Stromwerte wählen, indem man die Faktoren $\tilde{E}$ und $\cos\varphi$ der rechten Seite (indirekt) durch Stromstärken mißt. Dies geschieht in der sogenannten

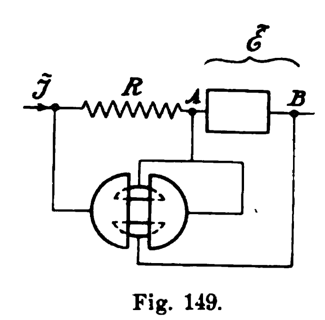


Fig. 149.

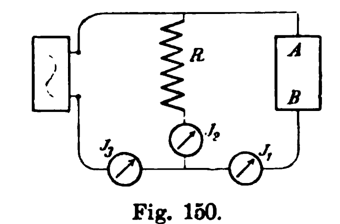


Fig. 150.

3-Amperemetermethode, bei welcher nach dem Schema der Fig. 150 ein passender Hilfswiderstand R (ohne Nebenkoeffizienten) parallel zu AB mit der zu bestimmenden Leistung geschaltet wird und sowohl die beiden Zweigströme $\tilde{J}_1$ und $\tilde{J}_2$ als auch der Summenstrom $\tilde{J}_3$ gemessen werden. Hieraus läßt sich die Leistung, welche zwischen A und B umgesetzt wird, in folgender Weise ableiten: Von den Augenblicksstromstärken ausgehend, für welche die Beziehung gelten muß

$$i_3 = i_1 + i_2,$$

folgt aus der Quadrierung

$$i_3^2 - i_1^2 - i_2^2 = 2\, i_1 \cdot i_2 = 2\, i_1 \cdot \frac{e_1}{R} = \frac{2}{R} \cdot w_1,$$

wenn e_1 die zu i_1 gehörige Augenblicksspannung zwischen den Enden des Zweiges 1 bezeichnet und ebenso w_1 die Augenblicksleistung in demselben. Beim Übergang zu den Meßwerten folgt wegen der selbsttätigen Integrierung der Augenblickswerte durch die Meßinstrumente

$$\tilde{W}_1 = \frac{R}{2} (\tilde{J}_3^2 - \tilde{J}_2^2 - \tilde{J}_1^2) = \tilde{W}_{A,B} + \tilde{J}_1^2 \cdot R_1.$$

Man erhält also die gesuchte Leistung in Watt, wenn man unter Einsetzung von R in Ω und der 3 Stromstärken in wahren Ampere von dem errechneten Wert $\tilde{W}_1$ den Wattverbrauch $\tilde{J}_1^2 R_1$ des Amperemeters zur Messung von $\tilde{J}_1$ in Abzug bringt. Auf Grund der in **66** angegebenen Überlegung hat man auch hier, mit Rücksicht auf die prozentuale Zuverlässigkeit des End-

resultats, $\tilde{J}_2$ angenähert gleich $\tilde{J}_1$ zu wählen. Da dies in R, ebenso wie dort, die Opferung des **mindestens** gleichen Leistungsbetrages wie $\tilde{W}_{A,B}$ nur zum Zwecke der Messung bedingt, so wird diese Methode eine noch größere praktische Beschränkung in der Anwendung erfahren als die Spannungsmethode, obwohl auch sie in ihrem Ergebnis völlig unabhängig von Kurvenform und Periodenzahl ist.

Eine Abänderung dieser 3-Amperemetermethode, oder auch eine Mischung der Spannungs- und Stromstärkemethode dahingehend, daß nur die Summenstromstärke $\tilde{J}_3$ durch ein Amperemeter gemessen wird, hingegen die Spannung $\tilde{E}_1$, sowie die durch Variation von R erhaltenen Stromstärken $\tilde{J}_1$ und $\tilde{J}_1'$ durch ein umschaltbares Voltmeter, letztere auf indirektem Wege, ist von Reisz (ETZ 1900, 713) angegeben worden, doch bietet diese Methode wegen der Komplizierung keine Vorteile gegenüber der reinen Spannungsmethode.

b) Leistung bei Mehrphasenstrom.

70. Drei-Wattmeter-Methoden. Bei der Leistungsmessung von Mehrphasenstrom kommen, wie schon oben (62) erwähnt, praktisch vorerst nur die Wattmetermethoden in Frage. Unverketteter Mehrphasenstrom bietet in dieser Richtung gar nichts Neues,

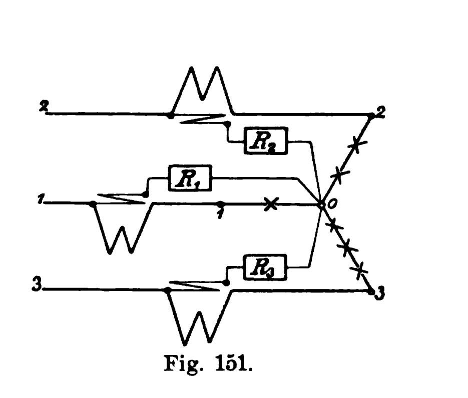


Fig. 151.

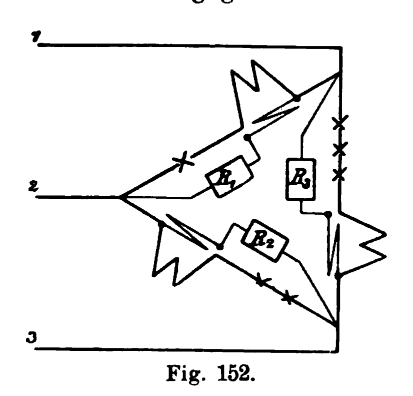


Fig. 152.

da offenbar die Leistung jeder Einzelphase, wie vorstehend angegeben, gemessen wird und ebensoviel Wattmeter als unverkettete Phasen erforderlich sind, wobei die Gesamtleistung $\tilde{W}$ bei dem skalaren Charakter der Leistung durch einfaches Summieren der Einzelleistungen $\tilde{W}_1 + \tilde{W}_2 + \tilde{W}_3$ in Phase 1, 2 und 3 erhalten wird, nachdem jede der Wattmeterablesungen durch die Anbringung der früher (63) behandelten Korrektionen auf die wahre Leistung reduziert worden ist.

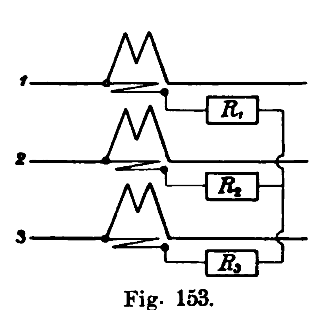


Fig. 153.

Bei einer Verkettung der Mehrphasenströme ist zunächst auch durch Verwendung eines Wattmeters für jede Phase die Messung mit den sogenannten 3-Wattmetermethoden ohne weiteres durchführbar, vorausgesetzt, daß die Schaltung je nach der Zugänglichkeit oder Unzugänglichkeit des Knotenpunktes bzw. der Dreieckseiten gewählt wird. Allgemein, d. h. für beliebige Belastungen und Phasenverschiebungen in den 3 Zweigen des Drehstromsystems ist die gesamte Drehstromleistung $\tilde{W}$ für Sternschaltung (Fig. 151) durch die Gleichung

$$\dot{W} = \tilde{J}_1 \cdot \tilde{E}_{1,0} \cos \varphi_{1,0} + \tilde{J}_2 \cdot \tilde{E}_{2,0} \cdot \cos \varphi_{2,0} + \tilde{J}_3 \cdot \tilde{E}_{3,0} \cdot \cos \varphi_{3,0}$$

dargestellt und für Dreieckschaltung (Fig. 152) durch die Gleichung

$$\dot{W} = \tilde{J}_{1,2} \cdot E_{1,2} \cos \varphi_{1,2} + \tilde{J}_{2,3} \cdot \tilde{E}_{2,3} \cdot \cos \varphi_{2,3} + \tilde{J}_{3,1} \cdot \tilde{E}_{3,1} \cdot \cos \varphi_{3,1}.$$

Bei Sternschaltung mit zugänglichem Knotenpunkt gibt alsdann Fig. 151 die Anordnung der 3 Wattmeter an, die zur Ermittelung des Wattbedarfs im Konsumgebiet noch die Anbringung der Hauptstromkreiskorrektion nach **63** benötigt. Für Dreieckschaltung mit zugänglichen Dreieckseiten deutet Fig. 152 das Schaltungsschema an, während Fig. 153 die Einschaltung der Wattmeter in die Zuleitung angibt, wenn Knotenpunkt bzw. Dreieckseiten nicht zugänglich sind. Die Enden der 3 gleich groß gewählten Widerstände R_{sp} werden hierbei entweder unter sich verbunden und so ein „künstlicher Knotenpunkt“ geschaffen, oder sie werden an den Neutral- oder Nullleiter angeschlossen, falls ein solcher vorhanden ist. Die Gesamtleistung $\dot{W}$ wird in allen Fällen, d. h. auch für beliebige unsymmetrische Belastung der 3 Phasen, die in Fig. 151 und 152 durch die verschiedene Zahl der Kreuze angedeutet sein soll, durch die Summe der von den 3 Wattmetern angezeigten Watt, also durch $\tilde{W}_1 + \tilde{W}_2 + \tilde{W}_3$ geliefert.

Im Allgemeinen wird es aber das Bestreben der Meßtechnik sein müssen, mit möglichst wenig Instrumenten auszukommen, so daß bei Drehstrom die Frage entsteht, ob die Verkettung (neben der Ersparung von Leitungsmaterial als Hauptzweck) nicht eine Verminderung der Meßinstrumente gegenüber dem unverketteten System zuläßt. Dies ist auch tatsächlich der Fall. Allerdings darf dies Bestreben nach Vereinfachung der Messung nicht auf Kosten der Richtigkeit des Ergebnisses erfolgen, wie es anfangs bei einigen Vorschlägen zur möglichst einfachen Ermittelung von Drehstromleistungen wohl der Fall war, indem man Schaltungen, die nur für symmetrische Belastung aller 3 Zweige richtige Ergebnisse liefern, auch allgemein auf beliebige Zweigbelastungen ausdehnen wollte. Während man nämlich bei symmetrischer Belastung mit einem Wattmeter auskommt, muß man zur Ermittelung der wahren Drehstromleistung bei unsymmetrischer Belastung (Stromstärke) oder bei unsymmetrischen Spannungsverhältnissen in den 3 Zweigen (vgl. I, 2 in **166**) unbedingt zwei Wattmeter mit fester Einschaltung der Hauptstromwickelung verwenden (siehe **72**).

71. Ein-Wattmeter-Methode bei symmetrischer Belastung.

Bei völlig symmetrischen Verhältnissen, d. i. bei Gleichheit aller 3 Faktoren (siehe Gleichungen in **70**) in den 3 Zweigen, ist 1 Wattmeter zur Bestimmung der Drehstromleistung $\dot{W}$ ausreichend. Die Schaltung erfolgt bei Dreieck mit zugänglicher Dreieckseite nach Fig. 154, bei Stern mit zugänglichem Knotenpunkt bzw. Neutralleiter wie in Fig. 155. In beiden Fällen kann man die gesamte Drehstromleistung $\dot{W} = 3\,\tilde{W}_1$ setzen, wenn $\tilde{W}_1$ die vom Wattmeter angegebene, bereits korrigierte Leistung bedeutet, welche bei Fig. 154 und 155 durch Anbringung der Hauptstromkreiskorrektion erhalten wird (**63**). Ist Dreieckseite bzw. Knotenpunkt nicht zugänglich, so kann die Messung trotzdem mit nur einem Wattmeter erfolgen, doch muß man alsdann entweder einen für die Dreieckspannung $\tilde{E}_{1,2}$ berechneten Vorschaltwiderstand $R_{1,2}$ (**63**) in Verbindung mit einem Umschalter anwenden (Fig. 156), oder noch besser zwei solche Vorschaltwiderstände mit fester Einschaltung nach Fig. 157.

Mit Schaltung nach Fig. 156 wird das Wattmeter bei Kontaktstellung 1. 2 die Leistung $W_1 = \tilde{J}_1 \cdot \tilde{E}_{1,2} \cdot \cos \varphi_{1,2}$ messen (vgl. hierzu das Kreisdia-

gramm der Fig. 158), hingegen bei Kontaktstellung 1, 3 die Leistung $\overset{\circ}{W}_2 = \tilde{J}_1 \cdot \tilde{E}_{1,3} \cdot \cos \varphi_{1,3}$. Bezeichnet man mit $\cos \varphi_{1,0}$ den Leistungsfaktor im Konsumgebiet, oder mit $\varphi_{1,0}$ die äquivalente Phasenverschiebung zwischen jeder der 3 gleichen Leitungsstromstärken ($\tilde{J}_1 = \tilde{J}_2 = \tilde{J}_3$) und den zugehörigen Spannungen gegen den Nullpunkt, von denen $\tilde{E}_{1,0}$ in Fig. 158 punktiert eingetragen ist, so ist die Gesamtleistung $\overset{\circ}{W}$ bei Symmetrie

$$\overset{\circ}{W} = 3\,\tilde{J}_1 \cdot \tilde{E}_{1,0} \cdot \cos \varphi_{1,0} = \sqrt{3} \cdot \tilde{J}_1 \cdot \tilde{E}_{1,2} \cdot \cos \varphi_{1,0}.$$

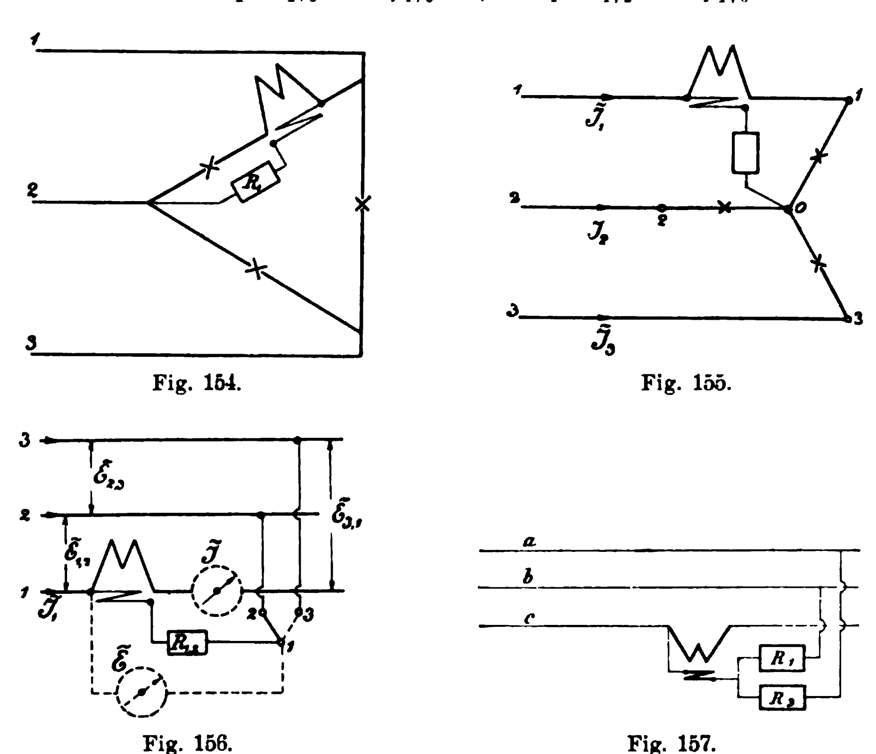


Fig. 154. Fig. 155. Fig. 156. Fig. 157.

Aus den goniometrischen Beziehungen der Fig. 158 folgt nun für jedes beliebig gewählte $\varphi_{1,0} = \varphi_{2,0} = \varphi_{3,0}$ zwischen 0 und 90 Grad, daß allgemein

$$\sqrt{3} \cdot \tilde{J}_1 \cdot \tilde{E}_{1,2} \cdot \cos \varphi_{1,0} = \tilde{J}_1 \cdot \tilde{E}_{1,3} \cdot \cos \varphi_{1,3} \pm \tilde{J}_1 \cdot \tilde{E}_{1,2} \cdot \cos \varphi_{1,2}$$

sein muß, oder

$$\overset{\circ}{W} = \overset{\circ}{W}_2 \pm \overset{\circ}{W}_1,$$

was bei Voreilung von $\tilde{J}$ in $\overset{\circ}{W}_1 \pm \overset{\circ}{W}_2$ übergeht.

Hierbei gilt das Vorzeichen + für alle Phasenverschiebungen von $\varphi_{1,0}$ zwischen 0 und 60°, bzw. $\varphi_{1,2}$ zwischen 30° und 90° (bei Voreilung gelten diese Grenzen für $\varphi_{1,3}$), hingegen das Vorzeichen — für alle Phasenverschiebungen von $\varphi_{1,0}$ zwischen 60° und 90°. Im Zweifelsfalle wird das Vorzeichen durch eine kleine Belastungsänderung festgestellt, da eine Belastungsvergrößerung beim Vorzeichen + auch eine Vergrößerung des kleineren Ausschlages, beim Vorzeichen — hingegen eine Verkleinerung desselben verursachen muß. Siehe hierzu auch in **99**.

Will man diese Umständlichkeit im vorliegenden Falle beseitigen, ebenso wie die Notwendigkeit einer Umschaltung der Spannungswickelung während der Messung, was bei Hochspannung gern vermieden wird, so kann man

dies durch die Überführung der Schaltung von Fig. 156 in diejenige der Fig. 157 erreichen. Hierdurch wird außerdem noch als weiterer Vorteil die Ermittelung der Gesamtleistung $\mathring{W}$ durch eine einzige Wattmeterablesung möglich, ohne stillschweigende Voraussetzung über die Unveränderlichkeit der Leistungsverhältnisse während der beiden aufeinanderfolgenden Messungen nach Fig. 156. Die algebraische Summierung der Leistungen $\tilde{W}_2 + \tilde{W}_1$ zu der gesamten Drehstromleistung $\mathring{W}$ erfolgt hier selbsttätig durch das Wattmeter, das durch seinen Ausschlag die Leistung $3 \cdot \tilde{E}_{1,0} \cdot \tilde{J}_1 \cdot \cos \varphi_{1,0}$ mißt (vgl. oben). Daß dies der Fall sein muß, folgt aus dem Kreisdiagramm der Fig. 158 bei Berücksichtigung der in Fig. 159 angedeuteten Schaltung. Zu der Stromstärke $\tilde{J}_1$ in der Hauptstromwickelung tritt als Ursache des Wattmeterausschlages α in der Spannungswickelung eine Stromstärke $\tilde{J}_{Sp}$,

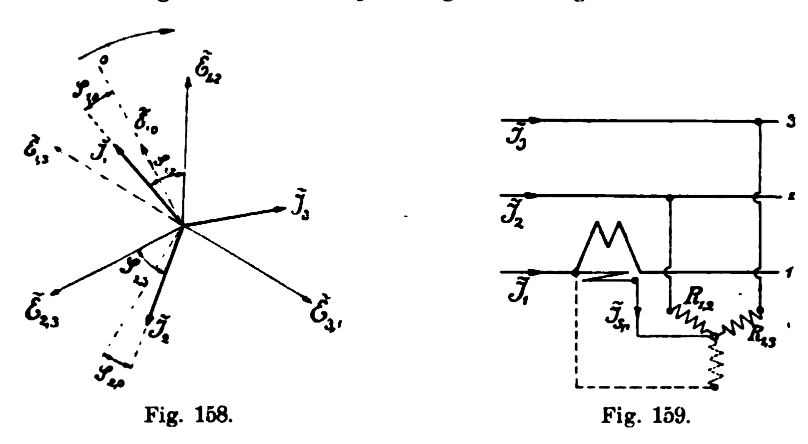


Fig. 158. Fig. 159.

welche sich nach dem Diagramme der Fig. 158 aus $\tilde{E}_{1,2} : R_{1,2}$ und aus $\tilde{E}_{1,3} : R_{1,3}$ zusammensetzt, also in Phase mit der Richtung von $\tilde{E}_{1,0}$ zusammenfällt und in Größe durch $\sqrt{3} \cdot \tilde{E}_{1,2} : R_{1,2}$ gegeben ist, falls $R_{1,2} = R_{1,3}$ gewählt wird. Da weiterhin $\tilde{E}_{1,2} = \sqrt{3}\, \tilde{E}_{1,0}$, so folgt $\tilde{J}_{Sp} = 3\, \tilde{E}_{1,0} : R_{1,2}$ und die Größe des Wattmeterausschlages α wird bedingt durch

$$C \cdot \alpha = 3 \frac{\tilde{E}_{1,0}}{R_{1,2}} \cdot \tilde{J}_1 \cdot \cos \varphi_{1,0}.$$

Hieraus folgt weiterhin noch zweierlei: Erstens, daß die vielfach angegebene Hinzufügung eines dritten Widerstandes in der in Fig. 159 strichliert angedeuteten Weise unter Bildung eines sogenannten „künstlichen Knoten punktes“ für den Anschluß der Spannungsspule hier überflüssig ist, da derselbe mangels eines nennenswerten Spannungswertes zwischen den Spannungskreisenden doch von keinem Strom durchflossen wird; zweitens, daß die erforderliche Größe von $R_{1,2} = R_{1,3}$ in Ω, um die zulässige Maximalstromstärke $\tilde{J}'_{Sp}$ in der Spannungsspule des Wattmeters nicht zu überschreiten, durch die Beziehung

$$\tilde{J}'_{Sp} \gtreqless \sqrt{3} \cdot \tilde{E}_{1,2} : R_{1,2} \quad \text{oder} \quad R_{1,2} \gtreqless \sqrt{3}\, \tilde{E}_{1,2} : \tilde{J}'_{Sp}$$

gegeben ist. Bei Einsetzung von $\tilde{E}_{1,2}$ in Volt und $\tilde{J}'_{Sp}$ in Ampere braucht man also für diese Messung einen reinen OHMschen Widerstand von $(2 \cdot \sqrt{3}\, \tilde{E}_{1,2} : \tilde{J}'_{Sp})\, \Omega$, der die Stromstärke $\frac{\tilde{J}'_{Sp}}{\sqrt{3}}$ Ampere verträgt und genau in der Mitte einen Anschluß für die Spannungsspule des Wattmeters besitzt.

Es sei aber schließlich nochmals betont, daß alle vorstehenden Methoden mit nur einem Wattmeter zwar für alle beliebigen Phasenverschiebungen ($\cos \varphi_{1,0}$), aber **nur für völlig symmetrische** Drehstromverhältnisse richtige Werte liefern, wie aus den oben abgeleiteten Formeln und der Betrachtung des Kreisdiagramms in Fig. 158 auch sofort hervorgeht. Diese Voraussetzung ist aber praktisch äußerst selten so ausreichend erfüllt, daß man diese Methoden ohne weiteres anwenden kann, selbst wenn man als Belastung Drehstromapparate, wie Transformatoren oder Motoren benutzt, bei denen die Symmetrie der 3 Zweige (Wickelungen und Belastungen bzw. magnetische Widerstände) hinreichend gewährleistet erscheint. Alsdann bleibt nämlich noch zu untersuchen, ob die zugeführten Spannungen hinreichende Symmetrie besitzen, da hiervon die Symmetrie der Ausgleichverhältnisse und des Kreisdiagramms (Fig. 158) in hohem Grade abhängig ist, und gerade diese Symmetrie wird bei längeren Leitungen mit anderweitig vorhandenen Unsymmetrien der Belastung auf Grund von Verzerrungen des Kreisdiagramms

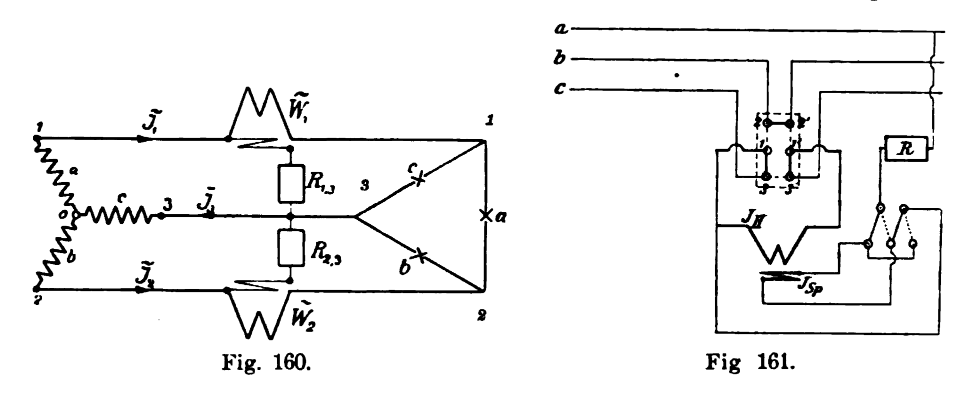


Fig. 160. Fig 161.

(siehe hierzu I, 2 in **166**) vielfach nicht ausreichend erfüllt sein. Es muß hierbei namentlich berücksichtigt werden, daß schwach belastete Drehstromkonsumapparate in der Symmetrie des Leistungskonsums der einzelnen Phasen außerordentlich empfindlich sind und bereits deutlich auf Spannungsverschiedenheiten reagieren, welche mit dem Voltmeter kaum nachweisbar sind. Aus diesem Grunde wird man bei genaueren Messungen im Zweifelsfalle wohl meist auf die einfacheren Meßanordnungen mit nur einem Wattmeter verzichten und die zuverlässigere Ermittelung mit 2 Wattmetern, welche für alle Fälle, d. h. auch bei beliebiger unsymmetrischer Belastung richtige Ergebnisse liefert, vorziehen.

72. Zwei-Wattmeter-Methode. Die Zweiwattmetermethode mit der in Fig. 160 angedeuteten Schaltung liefert für alle denkbaren Fälle eines mit 3 Leitungen ausgeführten verketteten Mehrphasenbetriebes die richtige Angabe der durch die Leitung übertragenen Leistung, gilt also ebenso gut für verketteten Zweiphasenstrom mit der Leitung 3 als gemeinschaftlicher Rückleitung, wie für Drehstrom (ohne vierten oder Nullleiter), jedoch braucht weder Dreieckseite noch Knotenpunkt zugänglich zu sein. Die gesamte Drehstromleistung $\tilde{W}$ wird durch die algebraische Summe $\tilde{W}_1 \pm \tilde{W}_2$ der beiden Wattmeterangaben erhalten, wenn $\tilde{W}_1 = C_1 \cdot \alpha_1 \cdot R_{1,3}$ und $\tilde{W}_2 = C_2 \cdot \alpha_2 \cdot R_{2,3}$, so daß also bei Anwendung zweier gleicher Wattmeter, d. h. für $C_1 = C_2$ und für $R_{1,3} = R_{2,3}$, die Gesamtleistung durch

$$\tilde{W} = C_1 \cdot R_{1,3} (\alpha_1 \pm \alpha_2)$$

gegeben ist. Ehe auf die Wahl des Vorzeichens eingegangen wird, sei der Beweis dafür gegeben, daß dieser Ausdruck sowohl für Stern als Dreieck und für beliebig große Stromstärken und Phasenverschiebungen in den Einzelzweigen a, b, c (Fig. 160) stets die richtige Leistung liefert, natürlich nach Anbringung der in **63** und **64** behandelten Wattmeterkorrektionen.

Benutzt man die bereits in **70** verwendete Indexbezeichnung für die Zweiggrößen, so erhält man zunächst für den Augenblickswert der Drehstromleistung $\dot{w}$ bei Sternschaltung (Fig. 160 links)

$$\dot{w} = e_{0,1} \cdot i_1 + e_{0,2} \cdot i_2 + e_{0,3} \cdot i_3 .$$

Da nun $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ oder $i_3 = -(i_1 + i_2)$, so folgt bei Ausscheidung von i_3

$$\dot{w} = i_1 (e_{3,0} + e_{0,1}) + i_2 (e_{3,0} + e_{0,2}).$$

Ersetzt man die Summe der Sternspannungen durch die Fernleitungsspannungen, so wird

$$\dot{w} = i_1 \cdot e_{3,1} + i_2 \cdot e_{3,2},$$

oder durch Übergang von den Augenblickswerten zu den selbsttätig von den Wattmetern angegebenen Mittelwerten

$$\mathring{W} = \tilde{W}_{1,3} \pm \tilde{W}_{2,3} .$$

Wie Fig. 160 erkennen läßt, liefert der Augenblicksantrieb bei Wattmeter 1 tatsächlich ein Maß für $i_1 \cdot e_{1,3}$ und bei Wattmeter 2 für $i_2 \cdot e_{2,3}$. Infolge der selbsttätigen a l g e b r a i s c h e n Summierung aller Augenblicksleistungen durch die stationären Wattmeterangaben (II, 1 in **26**) wird also die wahre Drehstromleistung bei Sternschaltung gemessen zu

$$\mathring{W} = \tilde{J}_1 \cdot \tilde{E}_{1,3} \cdot \cos \varphi_{1,3} \pm \tilde{J}_2 \cdot \tilde{E}_{2,3} \cos \varphi_{2,3} .$$

Der Übergang von + über Null in — beim Hinauswachsen von $\varphi_{2,0}$ über 60^0, bzw. $\varphi_{2,3}$ über 90^0 folgt aus einer ganz gleichen Überlegung, wie sie in **71** bei Fig. 156 und 158 angestellt wurde.

Für Dreieckschaltung (Fig. 160 rechts) gilt stets

$$\dot{w} = e_{1,2} \cdot i_{1,2} + e_{2,3} \cdot i_{2,3} + e_{3,1} \cdot i_{3,1} .$$

Aus $e_{1,2} + e_{2,3} + e_{3,1} = 0$ oder $e_{1,2} = -(e_{2,3} + e_{3,1})$ folgt bei Ausscheidung von $e_{1,2}$

$$\dot{w} = e_{2,3} (i_{2,3} + i_{2,1}) + e_{3,1} (i_{3,1} + i_{2,1}).$$

Ersetzt man die Summe der Ströme in den Dreieckseiten durch die Fernleitungsstromstärken, so wird

$$\dot{w} = e_{2,3} \cdot i_2 + e_{3,1} \cdot i_1$$

oder wie oben

$$\mathring{W} = \tilde{W}_{1,3} \pm \tilde{W}_{2,3} .$$

Die Schaltung der Fig. 160 gibt somit ganz allgemein die Drehstromleistung $\mathring{W}$, mögen die Schaltungsweisen der Drehstromzweige und deren Belastungen sein, welche sie wollen. Die Entscheidung über das Vorzeichen pflegt man in Zweifelsfällen, die aber nur selten, etwa bei leerlaufenden Motoren vorliegen, durch eine Änderung der Belastung vorzunehmen in der in **71** angegebenen Weise.

Bei Drehstromanlagen mit viertem oder Nullleiter wird die Messung bei symmetrischer Belastung mit einem Wattmeter ausführbar, wie in **70** bei

Fig. 155 angegeben. Bei unsymmetrischen Belastungen ist man für eine einwandfreie Messung aber genötigt zu der in **70** angegebenen Dreiwattmetermethode zu greifen mit der in Fig. 151 angegebenen Schaltung unter Verbindung der Enden aller 3 Spannungsspulenkreise mit dem Nullleiter.

Erwähnt sei noch, daß man die (für verkettete Wechselströme mit 3 Leitungen) weitaus wichtigste Zweiwattmetermethode der Fig. 160 in Ermangelung zweier gleicher passender Wattmeter auch mit einem Wattmeter und zwei aufeinanderfolgenden Messungen, mit Umschaltung der Hauptstromspule aus der Leitung c in die Leitung b der Fig. 161, ausführen kann. Da dies im Gegensatz zu der Schaltung in Fig. 160, wo die Ablesungen von W_1 und W_2 gleichzeitig erfolgen, für den Zeitraum zwischen den beiden Ablesungen unveränderte Leistungsverhältnisse voraussetzt, so ist zur möglichsten Verkleinerung dieses Zeitraums unter gleichzeitiger Vermeidung eines verhängnisvollen Irrtums bei der Reihenfolge der

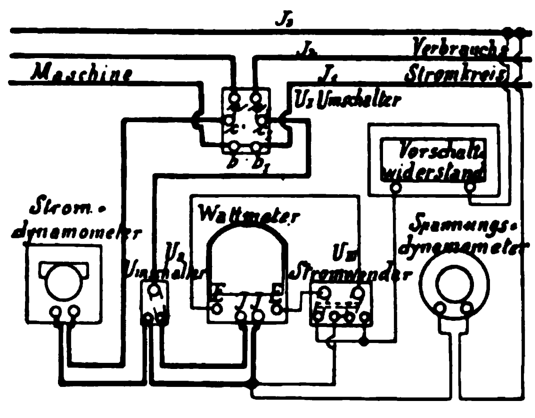


Fig. 162.

Schaltungsoperationen — eine Unterbrechung der Hauptstromleitungen 1 und 2 muß unter allen Umständen vermieden werden — in diesem Falle eine selbsttätige zwangläufige Schaltvorrichtung erwünscht. Eine solche ist zuerst von WEINHOLD (Chemnitz) angegeben und auch für Hochspannungsmessungen konstruktiv ausgebildet worden, während derartige Umschalter für Niederspannungsmessungen jetzt in einfacherer Form von den S. S. W. listenmäßig auf den Markt gebracht werden.

Das vollständige Schaltungsschema bei Benutzung eines direktzeigenden Wattmeters, sowie Strom- und Spannungsmessers nach S. & H. ist in Fig. 162 wiedergegeben.

Weiteres über Schaltungen zur Messung von Drehstromleistungen siehe auch bei den Messungen an Generatoren (**89**) und Motoren (**99**), ferner in der letzten Abteilung dieses Bandes bei den Drehstromzählern, die ja durchweg Drehstromwattmeter in Verbindung mit einem Uhr- bzw. Zählwerk darstellen zur Berücksichtigung des Zeitfaktors neben dem Antrieb, der mit der Intensität der Energiewandlung, hier der Drehstromleistung, proportional wachsend gewählt wird. Ferner wäre zu verweisen auf MÖLLINGER (ETZ 1900, 573), auch SCHROTTKE (ETZ 1901, 657 und 743).

c) Leistungsfaktor und Phasenverschiebung.

73. Verhältnis von Phasenverschiebung und Leistungsfaktor.

Die Entstehung der mittleren Wechselstromleistung $\tilde{W}$ aus der Kurve der Augenblicksleistungen w mit ihren teils positiv, teils negativ zu rechnenden Energieflächen A (vgl. Fig. 163 sowie I, 2 in **157**) weist auf die Notwendigkeit hin, die Beziehung zwischen den 3 wichtigsten elektrischen Ausgleichgrößen, d. i. Spannung $\tilde{E}$, Stromstärke $\tilde{J}$ und Leistung $\tilde{W}$ dadurch zu ermöglichen, daß zu dem Produkt $\tilde{E} \cdot \tilde{J}$ noch ein Faktor hinzutritt, der zwischen 1 und 0 variiert.

Die Größe dieses Faktors hängt, wie aus Fig. 163 ersichtlich, eng mit der zeitlichen Verschiebung der e-Kurve und i-Kurve gegeneinander zusammen und läßt sich für die rechnerisch meist benutzte Annahme, daß der

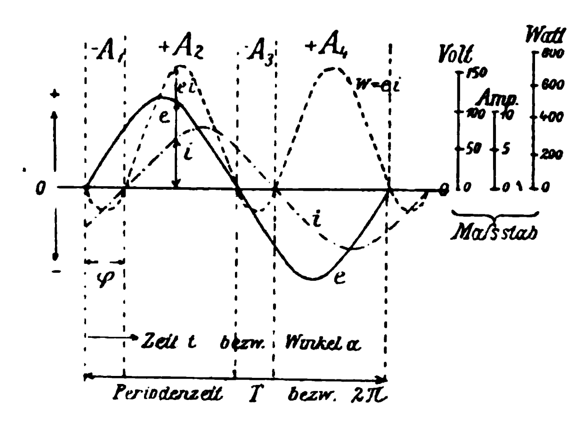


Fig. 163.

Verlauf dieser beiden Kurven dem Sinusgesetz folge, durch eine einfache Winkelfunktion dieser gegenseitigen Verschiebung φ, nämlich durch $\cos\varphi$ ausdrücken, wie die mathematische Ableitung für diesen Fall in ihrer Endbeziehung

$$\tilde{W} = \tilde{E} \cdot \tilde{J} \cdot \cos\varphi$$

erkennen läßt.

Dieser Begriff der Phasenverschiebung φ, welcher für die reine Sinuswelle völlig eindeutig ist, da er sowohl für die Nullwerte als für die Scheitelwerte der Kurven von e und i denselben Betrag besitzt, verliert aber diese Eindeutigkeit, sobald man zu den tatsächlichen Kurven der Wechselstromerzeuger übergeht, die nie genau dem Sinusgesetz folgen, sondern stets mehr oder weniger große Abweichungen aufweisen, die, wie in **15** und **61** gezeigt, durch das Vorhandensein von Oberschwingungen neben der Grundschwingung ihre Deutung und Formulierung erfahren können. Diese Oberschwingungen nun werden im allgemeinen bei Spannungs- und Stromkurve erhebliche Verschiedenheiten aufweisen (vgl. Fig. 124 ff.) und dadurch, trotz gleicher Grundschwingung beider, bewirken, daß die Scheitelwerte der Kurven einen anderen Phasenabstand besitzen als die Nullwerte. Dieses hatte bei dem mit der Belastung viel stärker schwankenden Charakter der Scheitelwerte, was sowohl die Form der Kurvengipfel als auch ihre Phasenverschiebung betrifft, zur Folge, daß man stillschweigend übereinkam, die Größe der Phasenverschiebung φ auf den Abstand der Nullwerte zu beziehen (vgl. Fig. 163).

Diese Phasenverschiebung φ_o entspricht aber nun nicht mehr der Anforderung, daß ihr Cosinus mit den für sich gemessenen wirksamen Mittelwerten $\tilde{E}$ und $\tilde{J}$ multipliziert die wahre Leistung $\tilde{W}$ ergibt. Die wahre Leistung $\tilde{W}$ setzt sich nämlich algebraisch aus der Leistung $\tilde{W}_1$ der Grundschwingung und den Leistungen $\tilde{W}_3$, $\tilde{W}_5$ usw. der Oberschwingungen zusammen, d. h. man kann setzen

$$\tilde{W} = \tilde{W}_1 \pm \tilde{W}_3 \pm \tilde{W}_5 \pm \tilde{W}_7 \pm \ldots$$

da man bei technischen Wechselstromerzeugern, oder genauer bei Wellen mit Symmetrie zum Nullniveau (vgl. I, 2 in **151**), nur die ungeraden Oberschwingungen zu berücksichtigen hat.

Die Untersuchung der praktisch vorliegenden Kurvenformen (siehe z. B. in **15** oder **61**) lehrt nun, daß die Oberschwingungen bei Spannung und Stromstärke die verschiedensten Phasenverschiebungen aufweisen, so daß φ_1 zwar nur im Zwischenraum von 0^0 bis 90^0 beim Generator, bzw. 90^0 bis 180^0 beim Konsumapparat sich bewegen kann, daß hingegen φ_3, φ_5 usf. auch beim Erzeuger zwischen 0^0 und 180^0 sich bewegen, woraus das teils positive, teils negative Vorzeichen bei $\tilde{W}_3$, $\tilde{W}_5$ usw. notwendig folgt.

Auf der anderen Seite können aber die Oberschwingungen bei dem für sich gemessenen Spannungswert $\tilde{E}$ und Stromstärkewert $\tilde{J}$ nur einseitig vergrößernd wirken und zwar nach der Formel, welche allgemein für die Übereinanderlagerung verschiedener Schwingungszahlen gilt (vgl. **15**, sowie I, 2 in **151**), wonach

$$\tilde{E}^2 = \tilde{E}_1^{\,2} + \tilde{E}_3^{\,2} + \tilde{E}_5^{\,2} + \tilde{E}_7^{\,2} + \ldots \qquad \text{oder}$$
$$\tilde{J}^2 = \tilde{J}_1^{\,2} + \tilde{J}_3^{\,2} + \tilde{J}_5^{\,2} + \tilde{J}_7^{\,2} + \ldots$$

Um also bei den Kurvenformen der Wechselstrompraxis die Gleichung zwischen der für sich, etwa mit dem Wattmeter gemessenen wahren Wechselstromleistung $\tilde{W}$ und den für sich gemessenen Werten der Spannung $\tilde{E}$ und Stromstärke $\tilde{J}$ herstellen zu können, bedarf man der Hinzufügung eines Faktors zu $\tilde{E} \cdot \tilde{J}$, der von $\cos \varphi_o$ mehr oder weniger abweicht. Bezeichnet man diesen Faktor als „Leistungsfaktor“ und drückt ihn durch $(\cos \varphi)$ aus, so wird diese Phasenverschiebung φ nicht mehr mit φ_o identisch sein, vielmehr eine mittlere oder besser energetische (auch äquivalente) Phasenverschiebung darstellen, welche eben durch die Beziehung

$$\cos \varphi = \frac{\tilde{W}}{\tilde{E} \cdot \tilde{J}}$$

definiert und gemessen wird.

Die oben angeführten Beziehungen gelten ganz allgemein und schließen auch den bis vor kurzem viel zu wenig beachteten Fall ein, daß die Grundschwingung die Periodenzahl 0 besitzt, d. h. in stationären Gleichstrom übergeht, so daß anstelle von $\tilde{W}_1$ der Wert $\overset{w}{W}_g = \overset{w}{E}_g \cdot \overset{w}{J}_g$ tritt und anstelle von $\tilde{E}_1$ und $\tilde{J}_1$ die Werte $\overset{w}{E}_g$ und $\overset{w}{J}_g$, während die dem Gleichstromniveau aufgelagerten Oberschwingungen der Einfachheit wegen durch eine (energetisch äquivalente Wechselstromwelle $\overset{w}{E}_\sim$ bzw. $\overset{w}{J}_\sim$ mit der Leistungskomponente $\overset{w}{W}_\sim$ sich berücksichtigen lassen. Gerade bei dieser Vereinigung von Gleichstrom- und Wechselstromgrößen, welche den kürzeren Namen Wellenstrom führt, kommt es sehr häufig vor, wie bereits früher (I, 2 in **158**) an einem Zahlenspiel gezeigt wurde, daß die Leistungskomponente $\overset{w}{W}_\sim$ entsprechend dem

obigen $\tilde{W}_3$ nicht allein negativ ist, sondern daß die energetische (äquivalente) Phasenverschiebung der Wechselkomponente bei den Wellenstromerzeugern dem Wert 180^0 sehr nahe rückt. Weiteres siehe in **110 ff.**

Als ein weiterer Sonderfall dieses Unterschiedes zwischen $\cos \varphi_o$ und $\cos \varphi$, der durch die Verschiedenheit der Phasenverschiebungen φ_3, φ_5 usf. der Oberschwingungen bei $\tilde{E}$ und $\tilde{J}$ bedingt wird und aus der mathematischen Formulierung ohne weiteres ableitbar ist, ist der Fall zu betrachten, in welchem $\cos \varphi_o = 1$, d. h. der Phasenabstand zwischen den Nullwerten der Spannungs- und Stromkurve zu Null wird. Auf diese Tatsache, daß alsdann der Leistungsfaktor ($\cos \varphi$) trotzdem nicht gleich der Einheit zu sein braucht, sondern je nach der verhältnismäßigen Größe von $\pm \tilde{W}_3 \pm \tilde{W}_5 \pm \tilde{W}_7 \pm \ldots$ gegenüber $\tilde{W}_1$ mehr oder weniger merklich kleiner als Eins sein kann, ist neuerdings nochmals besonders von Bauch (siehe ETZ 1903, 532; vgl. auch die hierzu gemachten Bemerkungen von Orlich und Cahen auf Seite 631 und 913) hingewiesen und dieser Sonderfall beim Leistungsfaktor mit dem besonderen Namen „Imparitätsfaktor" belegt worden. Bei dem schon stets gemachten Unterschied zwischen der Phasenverschiebung φ_o der Nullwerte und der energetischen Phasenverschiebung φ des Leistungsfaktors $\cos \varphi$ dürfte nach den obigen Ausführungen über die allgemeine Gültigkeit jener Unterscheidung kaum ein größeres Bedürfnis für die eigene Hervorhebung jenes Sonderfalles durch einen besonderen Namen vorliegen.

74. Messung des Leistungsfaktors und der Phasenverschiebung.

Aus dem Vorstehenden ergibt sich ohne weiteres, daß die Ermittelung des Leistungsfaktors ($\cos \varphi$) aufs Engste mit der Messung der Wechselstromleistung $\tilde{W}$ zusammenhängt, insofern nach der Definition des Leistungsfaktors zu

$$(\cos \varphi) = \tilde{W} : \tilde{E} \cdot \tilde{J}$$

neben der Feststellung der wahren Leistung $\tilde{W}$ nur noch eine gesonderte Messung der Spannung $\tilde{E}$ und der Stromstärke $\tilde{J}$ zu erfolgen hat, etwa wie in der Schaltung von Fig. 134 angedeutet worden ist.

Bei Einphasenstrom wird also die Messung des Leistungsfaktors durch eine der in **63** bis **69** angegebenen Methoden bereits mit erfolgen, wenn man bei den Wattmetermethoden noch einen Spannungsmesser für $\tilde{E}$ und einen Strommesser für $\tilde{J}$, wie in Fig. 134 bis 136 angegeben, hinzufügt, was ohnedies vom Meßtechniker zur Übersicht und zur Charakterisierung der Betriebsverhältnisse regelmäßig geschehen wird.

Bei den Methoden mit Hilfe mehrerer Spannungen oder Stromstärken ist diese gesonderte Messung von $\tilde{E}$ und $\tilde{J}$ gar nicht erforderlich, da sich der Leistungsfaktor direkt aus den Beobachtungen ableiten läßt, nämlich wie bereits in **66** bei der 3-Spannungsmethode angegeben, zu

$$\cos \varphi = \frac{\overline{E}_s^2 - E_r^2 - \tilde{E}^2}{2 \tilde{E}_r \cdot \tilde{E}}$$

und zu

$$\cos \varphi = \frac{\tilde{J}_3^2 - \tilde{J}_2^2 - \tilde{J}_1^2}{2 \tilde{J}_1 \cdot \tilde{J}_1^2}$$

bei der 3-Amperemetermethode (**69**).

Nicht ganz so einfach liegen die Verhältnisse bei dem verketteten Mehrphasenstrom. Zwar ist die Verschiebung in den einzelnen Phasen bei den Einwattmetermethoden der Fig. 154 und 155 unter Voraussetzung symmetrischer Belastung ganz in gleicher Weise zu bestimmen wie beim Ein-

phasenstrom mit der Schaltung nach Fig. 134. Ebenso bei beliebiger Belastung der Zweige bei Anwendung der 3-Wattmetermethode nach Fig. 151 und 152. Bei Benutzung der Fernleitungsgrößen zur Messung, wie in Fig. 156 bzw. Fig. 160, ist aber bereits darauf zu achten, daß die aus der Messung unmittelbar sich ergebende Beziehung zwischen einer Wattmeterablesung und den zugehörigen Werten von $\tilde{E}$ und $\tilde{J}$ **nicht** den Leistungsfaktor im Konsumgebiet ergeben kann, sondern nach dem Kreisdiagramm der Fig. 158

$$(\cos \varphi_{1,2}) = \tilde{W}_{1,2} : \tilde{E}_{1,2} \cdot \tilde{J}_1$$

liefert. Hieraus läßt sich nur unter der Annahme von Sinuswellen oder von $\varphi_{1,2} = \varphi_{1,0} + 30^0$ der Betrag von $\varphi_{1,0}$ bzw. weiterhin von $\cos \varphi_{1,0}$ ableiten.

Ähnlich liegen auch alle übrigen Fälle, in denen die Fernleitungsgrößen zur Messung herangezogen werden. Namentlich wäre die praktisch wichtigste 2-Wattmetermethode zu erwähnen. Bei unsymmetrischer Belastung kann man nur noch von einem **mittleren** Leistungsfaktor in der Übertragungsleitung bzw. bei den angeschlossenen Generatoren oder Konsumgebieten sprechen und diesen nach der Formel

$$\mathring{W} = \sqrt{3} \cdot (\tilde{E})_m \cdot (\tilde{J})_m \cdot (\cos \varphi)_m \qquad \text{zu}$$

$$(\cos \varphi)_m = \mathring{W} : \sqrt{3} \cdot (\tilde{E})_m \cdot (\tilde{J})_m$$

definieren und messen, indem man zu der nach Fig. 160 ermittelten Gesamtleistung $\mathring{W}$ die mittlere Drehstromspannung $(\tilde{E})_m$ und die mittlere Leitungsstromstärke $(\tilde{J})_m$ einsetzt. Bei **symmetrischer** Belastung, namentlich also bei Motoren, läßt aber die Ablesung an den beiden Wattmetern, etwa direktzeigenden Schalttafelinstrumenten nach dem Prinzip der Ferrariszeiger, eine **angenäherte** Bestimmung des Leistungsfaktors bzw. der äquivalenten Phasenverschiebung $\varphi_c = \varphi_{1,0}$ (Fig. 158) der Konsumapparate zu, auf Grund folgender einfacher Beziehung, die allerdings streng nur für Sinuswellen gilt: Wie aus dem Diagramm der Fig. 158 hervorgeht, sind bei der Schaltung nach Fig. 160 die Angaben $\tilde{W}_1$ und $\tilde{W}_2$ der beiden Wattmeter bedingt durch

$$\tilde{W}_1 = \tilde{E} \cdot \tilde{J} \cdot \cos(\varphi_{1,0} + 30^0) = \tilde{E} \cdot \tilde{J}(\cos \varphi_{1,0} \cdot \cos 30^0 - \sin \varphi_{1,0} \cdot \sin 30^0)$$

$$\tilde{W}_2 = \tilde{E} \cdot \tilde{J} \cdot \cos(\varphi_{1,0} - 30^0) = \tilde{E} \cdot \tilde{J}(\cos \varphi_{1,0} \cdot \cos 30^0 + \sin \varphi_{1,0} \cdot \sin 30^0).$$

Hieraus folgt

$$\tilde{W}_2 - \tilde{W}_1 = \tilde{E} \cdot \tilde{J} \cdot \sin \varphi_{1,0} \cdot 1$$

$$\tilde{W}_1 + \tilde{W}_2 = \tilde{E} \cdot \tilde{J} \cdot \cos \varphi_{1,0} \cdot \sqrt{3}.$$

Sonach

$$\operatorname{tg} \varphi_{1,0} = \sqrt{3} \cdot \frac{\tilde{W}_2 - \tilde{W}_1}{\tilde{W}_1 + \tilde{W}_2}.$$

Diese Beziehung besitzt insofern ein besonderes Interesse als hier die Ermittelung der äquivalenten Phasenverschiebung $\varphi_{1,0}$ ohne Messung von Spannung und Stromstärke möglich ist und aus der Ablesung der beiden Schaltbrettwattmeter allein, d. i. aus dem größeren Ausschlag $\tilde{W}_2$ und dem kleineren Ausschlag $\tilde{W}_1$, beide in Watt bzw. Kilowatt, schnell berechnet werden kann.

Aus den Ausführungen in **73** geht hervor, daß der Phasenverschiebungswinkel φ_0, welcher praktisch nur für die Nullwerte der Kurven eindeutig ist und vielfach noch für die aufsteigenden Kurven und die absteigenden Kurven verschieden ausfällt, eigentlich nur aus der Aufnahme der zusammengehörigen Kurven für $\tilde{E}$ und $\tilde{J}$, wie sie in **51** bis **61** angegeben wurde, entnommen werden kann. Auch wird die Ermittelung von φ_0 gegenüber der

Feststellung des Leistungsfaktors $\cos\varphi$ bzw. der energetischen Phasenverschiebung φ praktisch an Bedeutung weit zurückstehen.

Bemerkt sei nur noch, daß die Ermittelung der Phasenverschiebung mit sogenannten Leerstromzeigern (Phasometern), sowie auch mit in Graden geteilten direktzeigenden Phasenmessern, deren Ausführungen in der Abteilung 5 dieses Bandes beschrieben sind, auch die energetische oder äquivalente Phasenverschiebung φ, nicht den Wert von φ_0 liefert. Alle diese direktzeigenden Instrumente, sei es daß sie, wie das Phasometer von DOBROWOLSKY, in Ampere zur Angabe der Leerstromstärke ($\tilde{J} \cdot \sin\varphi$) geeicht sind, sei es, daß sie, wie der Phasenmesser von H. & BR., die Angabe des Phasenwinkels φ aus dem Verhältnis ($\sin\varphi : \cos\varphi$) $= \operatorname{tg}\varphi$ zweier beweglicher Spulen ableiten und in Winkelgraden geeicht sind, beruhen durchweg, wie früher (II, 1 in **27**) erwähnt, auf einer Abänderung des Wattmeterprinzips (vgl. hierzu auch in **6** den Hinweis auf die Kritik der Drehfeldinstrumente von TEICHMÜLLER). Die hierbei benutzte Integration der Augenblicksantriebe infolge der Trägheit des benutzten Zeigersystems schließt aber ohne weiteres auch die Angabe einer resultierenden (äquivalenten) Phasenverschiebung φ mit ein.

So brauchbar das Wattmeter ist, wenn es sich um die Messung von mittleren Leistungsfaktoren bzw. Phasenverschiebungen, etwa zwischen $\cos\varphi = 0{\cdot}05$ bis $0{\cdot}98$, handelt, so versagt diese Bestimmung auf der einen Seite bei sehr kleinen Leistungsfaktoren bzw. großen Phasenverschiebungen wegen der Kleinheit der Wattmeterausschläge in Verbindung mit der Zunahme des Korrektionsfaktors (vgl. hierzu in **64**), auf der anderen Seite bei einem Leistungsfaktor sehr nahe an 1 bzw. sehr kleinen Phasenverschiebungen wegen zu ungünstiger Meßverhältnisse hinsichtlich der Ballastgrößen, d. h. zu großer Unsicherheit auf Grund der unvermeidlichen Meßfehler von etwa $^1/_4$ bis $^1/_2$ % bei $\tilde{E}$, $\tilde{J}$ und $\tilde{W}$. Im ersteren Falle wird man sich entweder durch einen Kunstgriff helfen, wie die in **64** angeführte Resonanzschaltung, oder, wo dies nicht möglich ist, die Messung aus 3 Spannungen (**66**) vorziehen, welche günstigere Meßverhältnisse herzustellen erlaubt, oder man wird auch hier die sogleich zu beschreibende Hilfsmaschinenmethode in Anwendung bringen.

Im letzteren Falle, bei sehr kleinen Phasenverschiebungen, ist eine Messung von praktisch ausreichender Zuverlässigkeit viel schwieriger durchzuführen, zumal auch die direktzeigenden Phasenzeiger in dem Gebiet unter 10° Phasenverschiebung eine geringe Zuverlässigkeit besitzen und, abgesehen von den auch hier (ähnlich wie beim Wattmeter) vorhandenen Schaltungskorrektionen (**63**), Angaben machen, die sehr stark von der benutzten Meßspannung abhängen und leicht irreleiten. Zwar ist das von TEICHMÜLLER angegebene und untersuchte Spiegel-Phasometer (ETZ 1897 Heft 37 bis 43) wegen seiner mit $\sin\varphi$ proportionalen Angaben der gewöhnlichen Benutzung des Wattmeters überlegen, zeigt aber nach der Kritik TEICHMÜLLERS solche Mängel für die Bestimmung des Leistungsfaktors, daß man das folgende Verfahren vorziehen wird.

Eine Phasenverschiebung von wenigen Graden, oder gar von weniger als 1°, noch hinreichend genau ermitteln zu können, erfordert die Verwendung einer Hilfsmaschine mit genauer Messung einer relativen Verdrehung zwischen Anker und Magnet. Die Messung erfolgt hierbei mit Hilfe eines direktzeigenden Watt-

meters als Nullinstrument in folgender Weise:[1]) Es handelt sich praktisch um die Ermittelung einer Phasenverschiebung entweder zwischen zwei Spannungswerten, z. B. zwischen EMK und Klemmenspannung derselben Maschine, oder zwischen Spannung und Stromstärke innerhalb eines Stromkreisteiles. Zur Durchführung bedarf man einer mit dem Erzeuger direkt gekuppelten Hilfsmaschine von derselben Polzahl — hierdurch ist die Methode als reine Laboratoriumsmethode gekennzeichnet. Diese Hilfsmaschine besorgt die Speisung der Hauptstromspule des Wattmeters durch einen induktions- und kapazitätsfreien Widerstand mit der vollen zulässigen Wattmeterstromstärke, z. B. 2·5 Ampere, gleichzeitig bei voller, konstanter Belastung der Hilfsmaschine, während die elektrisch völlig getrennte Spannungsspule von den in ihrem Phasenabstand zu messenden Spannungen mit Hilfe eines induktionsfreien Widerstandes in beiderseits gleicher Weise beschickt wird. Um die relative Phasenverschiebung festzustellen, wird zunächst bei der ersten Messung genau auf Nullstellung des Wattmeters einreguliert, was durch eine Mikrometerschraube geschieht, welche Pole und Anker der Hilfsmaschine gegeneinander verdreht. Naturgemäß steht bei Messung der EMK der Versuchsmaschine die Hilfsmaschine fast genau um die halbe Polteilung (90 elektrische Grade) gegenüber der Versuchsmaschine verdreht und die genaue Einstellung ist auf einige Hundertel elektrische Grade möglich, da eine Umdrehung der hundertteiligen Mikrometerschraube einen räumlichen Grad oder bei 6 poligen Maschinen 3 elektrische Grade beträgt.

Wird hierauf die Spannungsspule auf die zweite Spannung, z. B. EMK, umgeschaltet, deren Phasenverschiebung gegenüber der ersten gemessen werden soll, so zeigt jetzt das Wattmeter einen Ausschlag. Die erforderliche Verdrehung der Hilfsmaschine, um den Ausschlag wieder auf Null zu bringen, gibt das Maß für die gesuchte Phasenverschiebung. Am genauesten wird auch hier die Ermittelung mit Hilfe der Interpolation, indem man mehrere Werte mit kleinen endlichen Ausschlägen auf beiden Seiten von Null mißt und den Schnittpunkt dieser (auf einer Geraden liegenden) Punkte mit der Nullachse graphisch oder rechnerisch bestimmt.

Soll die Phasenverschiebung zwischen einer Stromstärke $\tilde{J}$ und einer Spannung $\tilde{E}$ gemessen werden, so nimmt man ein zweites Wattmeter zu Hilfe, dessen Hauptstromspule von $\tilde{J}$ durchflossen wird, während seine Spannungsspule an die Klemmen der Hilfsmaschine gelegt wird. Stellt man jetzt zunächst wie oben die Pole der Hilfsmaschine auf Nullstellung des ersten Wattmeters ein, hierauf durch Verdrehen der Mikrometerschraube auf Nullstellung des zweiten Wattmeters, so gibt die Verdrehung das Maß für die Phasenverschiebung, da im ersten Fall $\tilde{E}$ elektrisch senkrecht steht zur Stromstärke der Hilfsmaschine, im zweiten Fall $\tilde{J}$ zur Klemmenspannung der Hilfsmaschine und damit auch wegen der induktionsfreien Belastung der letzteren zu ihrer Stromstärke.

---

1) Nach einer freundlichen mündlichen Mitteilung meines Kollegen Ossanna.

II. Zusammenhang der Einzelgröfsen.

A. Allgemeines und Normalien des V. D. E.

75. Übersicht und Behandlung des Stoffes.

Die im Vorausgegangenen behandelten Messungen der Einzelgrößen bilden neben den in Hdb. II, 1 angeführten Messungen die notwendigen Grundlagen oder Elemente für die Untersuchung der praktisch wichtigen Verhältnisse und Erscheinungen, welche an den technischen Wechselstromanlagen und ihren einzelnen Teilen auftreten.

Die Behandlung des Zusammenhanges der Einzelgrößen, wie er in Form von Charakteristiken, als der graphischen Darstellung des Meßergebnisses bei zusammengehörigen Versuchsreihen, in der Technik benutzt zu werden pflegt, gehört eigentlich bereits in die gesonderte Behandlung, welche die folgenden Bände des Handbuches, namentlich für die Wechselstrommaschinen und Transformatoren Bd. IV, V und IX, für die Leitungen und alle zugehörigen Apparate Bd. VI enthalten. Um aber den Anschluß sicherer zu gestalten, erschien es doch angezeigt, wenigstens die allgemeinen Gesichtspunkte und Meßanordnungen, welche bei der messenden Untersuchung der Umsetzungsapparate für Wechselstrom in Frage kommen, hier noch anzuschließen. Mit Rücksicht auf den verfügbaren Raum und auf eine leichtere Übersicht mußte aber eine ziemliche Beschränkung durch Auswahl der wichtigeren und grundlegenden Meßanordnungen Platz greifen und von vornherein auf die Anführung der sehr zahlreichen Variationen, welche zum Zweck von Sonderuntersuchungen angegeben worden sind, verzichtet werden. Was die Reihenfolge anlangt, so erschien es am natürlichsten zunächst die Meßschaltungen zur Untersuchung der synchronen Wechselstrommaschinen, d. i. der Erzeuger, Umformer und Synchronmotoren, hierauf die der Asynchronmotoren, endlich die der Transformatoren zu behandeln.

Die Richtungen, nach denen sich die Untersuchungen zu erstrecken haben, können in zwei Gruppen eingeteilt werden, die sich unter Benutzung der energetischen Ausdrucksweise vielleicht kurz als Untersuchung des Zusammenhanges der Intensitätsgrößen einerseits, der Quantitätsgrößen andererseits bezeichnen ließen. Von einem anderen mehr praktischen Standpunkt aus könnte man sie unterscheiden in Untersuchungen zur Aufstellung der Charakteristiken ohne Rücksicht auf den Zeitfaktor, d. h. unabhängig davon, ob die untersuchten Belastungsverhältnisse einen praktisch durchführbaren

Dauerbetrieb zulassen, und in Dauerversuche zur Feststellung der zulässigen Belastungen mit Rücksicht auf das Material.

Die erstere Gruppe der Untersuchungen wird hauptsächlich die Ermittelung der Spannungsverhältnisse abhängig von Erregung und Belastung, sowie die des Wirkungsgrades umfassen, die letztere sich hauptsächlich auf die Feststellung der zulässigen Dauerbelastung abhängig von Temperatur und Wärmeabführungsverhältnissen beziehen, sowie auf die Wirkung von Überlastungen bei begrenzter Zeitdauer.

Als Richtschnur werden in allen Fällen der Praxis gewisse Normen zu gelten haben, die durch Vereinbarung festgesetzt sind, also für deutsche Verhältnisse in erster Linie die Normalien des V. D. E. für elektrische Maschinen und Transformatoren, welche in ihren hier einschlägigen Bestimmungen unten (**76**) im Wortlaut folgen[1] (siehe ETZ 1902, 504, sowie auch Hdb. II, 1 in **208** und **209**). Für die Prüfung von Materialien finden sich weitere beachtenswerte Vorschläge zur Erzielung vergleichbarer Versuchsresultate in einem Aufsatz von HOLITSCHER (ETZ 1902, 147 und 170); siehe hierzu auch namentlich Hdb. VI, 1 in **31 ff.**

Die zulässigen Meßmethoden zur Erlangung eines praktisch brauchbaren Endresultates mit ausreichender prozentualer Zuverlässigkeit werden sich gleichfalls in zwei Gruppen gliedern lassen, die man als unmittelbare und mittelbare Verfahren unterscheiden könnte.

Bei den unmittelbaren Verfahren würden die Beobachtungen, aus denen das gesuchte Endresultat, wie z. B. der Wirkungsgrad η oder der prozentuale Spannungsabfall ε, abgeleitet wird, bei normalen Belastungsverhältnissen des Umsetzungsapparates erfolgen. Da dies aber bei großen Leistungen im Laboratorium oder auch bei den Abnahmeprüfungen oft nicht ausführbar ist, so sind in diesem Fall die mittelbaren Methoden, welche die Verlustgröße sehr angenähert für sich, etwa durch Leerlauf- und Kurzschlußversuche, zu bestimmen erlauben, als wertvolle Ergänzung jener unmittelbaren Methoden anzusehen. Wie noch weiter unten zu zeigen, werden jene mittelbaren Methoden die unmittelbaren um so vorteilhafter ersetzen können, einen je kleineren Prozentsatz die Verlustgröße von der normalen Betriebsgröße ausmacht. Im Folgenden sind zunächst immer die unmittelbaren und hierauf die mittelbaren Verfahren behandelt.

Um Wiederholungen zu vermeiden, sei aber ausdrücklich noch einmal auf die Ausführungen der zweiten Abteilung dieses Bandes (Hdb. II, 1 in **208** bis **225**) verwiesen, welche die Untersuchungen an Gleichstromdynamos behandeln. Der Hauptsache nach sind sie ohne weiteres auch auf die Untersuchung von Wechselstrommaschinen übertragbar, so daß hier nur die bei Wechselstrom abweichenden und neu hinzutretenden Momente zu erwähnen wären. Dies wird namentlich die Meßanordnungen betreffen, welche deshalb in erster Linie behandelt sind.

Definitionen.

76. Normalien des V. D. E. für elektrische Maschinen und Transformatoren.

Generator oder Dynamo ist jede rotierende Maschine, die mechanische in elektrische Leistung verwandelt.

Motor ist jede rotierende Maschine, die elektrische in mechanische Leistung verwandelt.

---

[1] Mit Erlaubnis des V. D. E. zum Abdruck gebracht.

Motorgenerator ist eine Doppelmaschine, bestehend in der direkten mechanischen Kupplung eines Motors mit einem Generator.

Umformer ist eine Maschine, bei welcher die Umformung des Stromes in einem gemeinsamen Anker stattfindet.

Wird im folgenden das Wort elektrische Maschine oder Maschine schlechthin gebraucht, so ist darunter, je nach dem Zusammenhang, einer der vorgenannten Gegenstände zu verstehen.

Anker ist bei elektrischen Maschinen derjenige Teil, in welchem durch die Einwirkung eines magnetischen Feldes elektromotorische Kräfte erzeugt werden.

Transformator ist ein Apparat für Wechselströme ohne bewegte Teile zur Umwandlung elektrischer in elektrische Leistung.

Unter Spannung bei Drehstrom ist die verkettete effektive Spannung (Spannung zwischen je zwei der drei Hauptleitungen) zu verstehen.

Unter Sternspannung bei Drehstrom ist die Spannung zwischen dem Nullpunkt und je einem der drei Hauptleiter zu verstehen.

Unter Übersetzung bei Transformatoren ist das Verhältnis der Spannungen bei Leerlauf zu verstehen.

Unter Frequenz ist die Anzahl der vollen Perioden in der Sekunde zu verstehen.

Die für Wechselstrom gegebenen Vorschriften gelten sinngemäß auch für Mehrphasenstrom.

Allgemeine Bestimmungen.

§ 1.

Die folgenden Bestimmungen gelten nur insofern, als sie nicht durch ausdrücklich vereinbarte Lieferungsbedingungen abgeändert werden.

Ausgenommen hiervon sind die Vorschriften über die Leistungsschilder (vgl. §§ 4, 5, 6), die immer erfüllt sein müssen.

Maschinen oder Transformatoren ohne Leistungsschild oder mit einem anderen als dem weiter unten vorgeschriebenen Leistungsschild werden als diesen Normalien nicht entsprechend angesehen.

Leistung.

§ 2.

Als Leistung gilt bei allen Maschinen und Transformatoren die abgegebene. Dieselbe ist anzugeben bei Gleichstrom in Kilowatt (KW), bei Wechselstrom in Kilowatt mit Angabe des Leistungsfaktors. Bei Abgabe von mechanischer Leistung ist dieselbe in Pferdestärken (PS) anzugeben.

Außerdem sind anzugeben und auf dem Leistungsschild (vgl. §§ 4, 5, 6) oder auf einem besonderen Schild zu verzeichnen die normalen Werte von Tourenzahl bzw. Frequenz, Spannung und Stromstärke.

§ 3.

In bezug auf die Leistung sind folgende Betriebsarten zu unterscheiden:

a) der intermittierende Betrieb, bei dem nach Minuten zählende Arbeitsperioden und Ruhepausen abwechseln (z. B. Motoren für Krane, Aufzüge, Straßenbahnen u. dgl.);

b) der kurzzeitige Betrieb, bei dem die Arbeitsperiode kürzer ist, als nötig, um die Endtemperatur zu erreichen, und die Ruhepause lang genug, damit die Temperatur wieder annähernd auf die Lufttemperatur sinken kann;

c) der Dauerbetrieb, bei dem die Arbeitsperiode so lang ist, daß die Endtemperatur erreicht wird.

§ 4.

Als normale Leistung von Maschinen und Transformatoren für intermittierende Betriebe ist die Leistung zu verstehen und anzugeben, welche ohne Unterbrechung eine Stunde lang abgegeben werden kann, ohne daß die Temperaturzunahme den weiter unten als zulässig bezeichneten Wert überschreitet. Die Leistung ist auf einem Schild unter der Bezeichnung „intermittierend“ anzugeben.

§ 5.

Als normale Leistung von Maschinen und Transformatoren für kurzzeitigen Betrieb ist die Leistung zu verstehen und anzugeben, welche während der vereinbarten Betriebszeit abgegeben werden kann, ohne daß die Temperaturzunahme den weiter unten als zulässig bezeichneten Wert überschreitet. Diese Leistung ist unter der Bezeichnung „für . . . St." auf einem Schild anzugeben.

§ 6.

Als normale Leistung von Maschinen und Transformatoren für Dauerbetrieb ist die Leistung zu verstehen und anzugeben, welche während beliebig langer Zeit abgegeben werden kann, ohne daß die Temperaturzunahme den weiter unten als zulässig angegebenen Wert überschreitet. Diese Leistung ist auf einem Schild unter der Bezeichnung „dauernd" anzugeben.

§ 7.

Die gleichzeitige Angabe der Leistung für verschiedene Betriebsarten ist zulässig.

§ 8.

Bei Generatoren und Umformern mit veränderlicher Spannung genügt die Verzeichnung der normalen Werte von Spannung, Stromstärke und Tourenzahl auf dem Schild; die zusammengehörigen Grenzwerte müssen jedoch in den Lieferungsbedingungen angegeben werden.

§ 9.

Maschinen mit Kollektor müssen bei jeder Belastung innerhalb der zulässigen Grenzen bei günstigster Bürstenstellung und eingelaufenen Bürsten so weit funkenfrei laufen, daß ein Behandeln des Kollektors mit Glaspapier oder dgl. höchstens nach je 24 Betriebsstunden erforderlich ist.

Temperaturzunahme.

§ 10.

Die Temperaturzunahme von Maschinen und Transformatoren ist bei normaler Leistung und unter Berücksichtigung der oben definierten Betriebsarten zu messen, nämlich:

1. bei intermittierenden Betrieben nach Ablauf eines ununterbrochenen Betriebes von einer Stunde:
2. bei kurzzeitigen Betrieben nach Ablauf eines ununterbrochenen Betriebes während der auf dem Leistungsschild verzeichneten Betriebszeit;
3. bei Dauerbetrieben:
   a) bei Maschinen nach Ablauf von zehn Stunden;
   b) bei Transformatoren nach Ablauf jener Betriebszeit, welche nötig ist, um die stationäre Temperatur zu erreichen.

§ 11.

Sofern für kleinere Maschinen unzweifelhaft feststeht, daß die stationäre Temperatur in weniger als zehn Stunden erreicht wird, so kann die Temperaturzunahme nach entsprechend kürzerer Zeit gemessen werden.

§ 12.

Bei der Prüfung auf Temperaturzunahme dürfen die betriebsmäßig vorgesehenen Umhüllungen, Abdeckungen, Ummantelungen usw. von Maschinen und Transformatoren nicht entfernt, geöffnet und erheblich verändert werden. Eine etwa durch den praktischen Betrieb hervorgerufene und bei der Konstruktion in Rechnung gezogene Kühlung kann im allgemeinen bei der Prüfung nachgeahmt werden, jedoch ist es nicht zulässig, bei Straßenbahnmotoren den durch die Fahrt erzeugten Luftzug bei der Prüfung künstlich herzustellen.

§ 13.

Als Lufttemperatur gilt jene der zuströmenden Luft oder, wenn keine entschiedene Luftströmung bemerkbar ist, die mittlere Temperatur der die Maschine

umgebenden Luft in Höhe der Maschinenmitte, wobei in beiden Fällen in etwa 1 m Entfernung von der Maschine zu messen ist. Die Lufttemperatur ist während des letzten Viertels der Versuchszeit in regelmäßigen Zeitabschnitten zu messen und daraus der Mittelwert zu nehmen.

§ 14.

Wird ein Thermometer zur Messung der Temperatur verwendet, so muß eine möglichst gute Wärmeleitung zwischen diesem und dem zu messenden Maschinenteil herbeigeführt werden, z. B. durch Stanniolumhüllung. Zur Vermeidung von Wärmeverlusten wird die Kugel des Thermometers und die Meßstelle außerdem mit einem schlechten Wärmeleiter (trockener Putzwolle u. dgl.) überdeckt. Die Ablesung findet erst statt, nachdem das Thermometer nicht mehr steigt.

§ 15.

Mit Ausnahme der mit Gleichstrom erregten Feldspulen und aller ruhenden Wickelungen werden alle Teile der Generatoren und Motoren mittels Thermometers auf ihre Temperaturzunahme untersucht.

Bei thermometrischen Messungen sind, soweit wie möglich, jeweilig die Punkte höchster Temperatur zu ermitteln, und die dort gemessenen Temperaturen sind maßgebend.

§ 16.

Die Temperatur der mit Gleichstrom erregten Feldspulen und aller ruhenden Wickelungen bei Generatoren und Motoren ist aus der Widerstandszunahme zu bestimmen. Dabei ist, wenn der Temperaturkoeffizient des Kupfers nicht für jeden Fall besonders bestimmt wird, dieser Koeffizient als 0,004 anzunehmen.

§ 17.

Bei Transformatoren wird die höchste an irgend einem Punkte vorkommende Temperatur der Wickelungen durch Thermometer gemessen. Bei Öltransformatoren wird die Temperatur der oberen Ölschichten gemessen.

§ 18.

In gewöhnlichen Fällen und insofern die Lufttemperatur 35° C nicht übersteigt, darf die nach §§ 15 bis 17 ermittelte Temperaturzunahme folgende Werte nicht übersteigen:

a) an isolierten Wickelungen und Schleifringen
bei Baumwollisolierung . . . . 50° C
„ Papierisolierung . . . . 60° C
„ Isolierung durch Glimmer, Asbest und deren Präparate . . . . . . 80° C
Für ruhende Wickelungen sind um 10° C höhere Werte zulässig.
b) an Kollektoren . . . . 60° C
c) an Eisen von Generatoren und Motoren, in das Wickelungen eingebettet sind, je nach der Isolierung der Wickelung die Werte unter a).

§ 19.

Bei Straßenbahnmotoren darf die nach §§ 15 und 16 nach einstündigem ununterbrochenem Betriebe mit normaler Belastung im Versuchsraum ermittelte Temperaturzunahme folgende Werte nicht übersteigen:

a) an isolierten Wickelungen und Schleifringen
bei Baumwollisolierung . . . . 70° C
„ Papierisolierung . . . . 80° C
„ Isolierung durch Glimmer, Asbest und deren Präparate . . . . . . 100° C
Eine Erhöhung dieser Grenzen für ruhende Wickelungen ist nicht zulässig.
b) an Kollektoren . . . . 80° C
c) an Eisen, in das Wickelungen eingebettet sind, je nach der Isolierung der Wickelung die Werte unter a).

§ 20.

Bei kombinierten Isolierungen gilt die untere Grenze.

§ 21.

Bei dauernd kurzgeschlossenen Wickelungen können vorstehende Grenzwerte überschritten werden.

Überlastung.

§ 22.

Im praktischen Betriebe sollen Überlastungen nur so kurze Zeit oder bei solchem Temperaturzustand der Maschinen und Transformatoren vorkommen, daß die zulässige Temperaturzunahme dadurch nicht überschritten wird. Mit dieser Einschränkung müssen Maschinen und Transformatoren in den folgenden Grenzen überlastungsfähig sein:

Generatoren Motoren Umformer	25 % während $^1/_2$ Stunde, wobei bei Wechselstromgeneratoren der Leistungsfaktor nicht unter dem auf dem Schilde verzeichneten Werte anzunehmen ist.
Motoren Umformer Transformatoren	40 % während 3 Minuten, wobei für Motoren die normale Klemmenspannung einzuhalten ist.

Der Kollektor der Gleichstrommaschinen und Umformer darf hierbei nicht so stark angegriffen werden, daß der Gang bei normaler Leistung dem § 9 nicht mehr genügt.

In bezug auf mechanische Fertigkeit müssen Maschinen, die betriebsmäßig mit annähernd konstanter Tourenzahl arbeiten, leerlaufend eine um 15 % erhöhte Tourenzahl unerregt und vollerregt 5 Minuten lang aushalten.

§ 23.

Generatoren müssen bei konstanter Tourenzahl die Spannung bis zu 15 % Überlastung konstant halten können, wobei der Leistungsfaktor bei Wechselstromgeneratoren nicht unter dem auf dem Schilde verzeichneten Werte anzunehmen ist.

§ 24.

Die Prüfung soll die mechanische und elektrische Überlastungsfähigkeit ohne Rücksicht auf Erwärmung feststellen und deshalb bei solcher Temperatur beginnen, daß die zulässige Temperaturzunahme nicht überschritten wird.

§ 25.

Diese Vorschriften gelten auch für Generatoren mit veränderlicher Spannung, bei denen die Spannungsänderung durch annähernd proportionale Änderung der Tourenzahl erreicht wird. Bei Generatoren mit annähernd konstanter Tourenzahl (so daß sie bei normaler Spannung mit abgeschwächtem Felde arbeiten) ist von einer Überlastungsprobe abzusehen. Das gleiche gilt von Motoren, wenn sie mit abgeschwächtem Felde arbeiten.

Isolation.

§ 26.

Die Messung des Isolationswiderstandes wird nicht vorgeschrieben, wohl aber eine Prüfung auf Isolierfestigkeit (Durchschlagsprobe, welche am Erzeugungsort, bei größeren Objekten auch vor Intriebsetzung am Aufstellungsort vorzunehmen ist. Maschinen und Transformatoren müssen imstande sein, eine solche Probe mit einer in nachfolgendem festgesetzten höheren Spannung, als die normale Betriebsspannung ist, eine halbe Stunde lang auszuhalten. Die Prüfung ist bei warmem Zustande der Maschine vorzunehmen und später nur ausnahmsweise zu wiederholen, damit die Gefahr einer späteren Beschädigung vermieden wird.

Maschinen und Transformatoren bis 5000 V sollen mit der doppelten Betriebsspannung, jedoch nicht mit weniger als 100 V geprüft werden. Maschinen und Transformatoren von 5000 bis 10000 V sind mit 5000 V Überspannung zu prüfen. Von 10000 V an beträgt die Prüfspannung das Eineinhalbfache der Betriebsspannung.

§ 27.

Diese Prüfspannungen beziehen sich auf Isolation von Wickelungen gegen das Gestell sowie bei elektrisch getrennten Wickelungen gegeneinander. Im letzteren

Falle ist bei Wickelungen verschiedener Spannung immer die höchste sich ergebende Prüfspannung anzuwenden.

§ 28.

Zwei elektrisch verbundene Wickelungen verschiedener Spannung sind gleichfalls mit der der Wickelung höchster Spannung entsprechenden Prüfspannung gegen Gestell zu prüfen.

§ 29.

Sind Maschinen oder Transformatoren in Serie geschaltet, so sind, außer obiger Prüfung, die verbundenen Wickelungen mit einer der Spannung des ganzen Systems entsprechenden Prüfspannung gegen Erde zu prüfen.

§ 30.

Obige Angaben über die Prüfspannung gelten unter der Annahme, daß die Prüfung mit gleicher Stromart vorgenommen wird, mit welcher die Wickelungen im Betriebe benutzt werden. Sollte dagegen eine betriebsmäßig von Gleichstrom durchflossene Wickelung mit Wechselstrom geprüft werden, so braucht nur der 0,7 fache Wert der vorgenannten Prüfspannung angewendet zu werden. Wird umgekehrt eine betriebsmäßig von Wechselstrom durchflossene Wickelung mit Gleichstrom geprüft, so muß die Prüfspannung 1,4 mal so hoch genommen werden, wie oben angegeben.

§ 31.

Ist eine Wickelung betriebsmäßig mit dem Gestell leitend verbunden, so ist diese Verbindung für die Prüfung auf Isolierfestigkeit zu unterbrechen. Die Prüfspannung einer solchen Wickelung gegen Gestell richtet sich dann aber auch nur nach der größten Spannung, welche zwischen irgend einem Punkte der Wickelung und des Gestelles im Betriebe auftreten kann.

§ 32.

Für Magnetspulen mit Fremderregung ist die Prüfspannung das Dreifache der Erregerspannung, jedoch mindestens 100 V.

Die Wickelung des Sekundärankers asynchroner Motoren ist mit der doppelten Anlaufspannung zu prüfen, jedoch mindestens mit 100 V. Kurzschlußanker brauchen nicht geprüft zu werden.

§ 33.

Maschinen und Transformatoren sollen durch 5 Minuten eine um 30 % erhöhte Betriebsspannung aushalten können.

Bei Maschinen darf die Überspannungsprobe mit einer Steigerung der Tourenzahl bis zu 15 % verbunden werden, wobei jedoch nicht gleichzeitig eine Überlastung eintreten darf.

Diese Prüfung soll nur die Isolierfestigkeit feststellen und bei solcher Temperatur beginnen, daß die zulässige Temperaturzunahme nicht überschritten wird.

Wirkungsgrad.

§ 34.

Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis der abgegebenen zur zugeführten Leistung. Er kann durch direkte Messung der Leistungen oder indirekt durch Messung der Verluste bestimmt werden. Die indirekten Methoden sind leichter durchzuführen, durch Beobachtungsfehler weniger beeinflußt und aus diesen Gründen in der Regel vorzuziehen. Bei Angabe des Wirkungsgrades ist die Methode zu nennen, nach welcher er bestimmt werden soll, bzw. bestimmt wurde, wozu ein Hinweis auf den entsprechenden Paragraphen dieser Normalien genügt.

Die Angabe des Wirkungsgrades soll sich stets auf die dem normalen Betriebe entsprechende Erwärmung beziehen.

Der Wirkungsgrad ist unter Berücksichtigung der Betriebsart (vgl. §§ 4, 5, 6) anzugeben.

Wenn bei Wechselstrommotoren und Transformatoren nichts besonderes vereinbart ist, so braucht der angegebene Wirkungsgrad nur beim Anschluß an eine Strom-

quelle mit nahezu sinusförmiger EMK und, sofern Mehrphasensysteme in Betracht kommen, nur bei symmetrischen Systemen erreicht zu werden.

Der Wirkungsgrad ohne besondere Angabe der Belastung bezieht sich auf die normale Belastung.

Die für Felderregung nötige und im Feldrheostat verlorene Leistung ist als Verlust in Rechnung zu ziehen.

Wird künstliche Kühlung verwendet, so ist bei Angabe des Wirkungsgrades zu bemerken, ob die für die Kühlung erforderliche Leistung als Verlust mit in Rechnung gezogen ist. Fehlt eine derartige Bemerkung, so versteht sich der Wirkungsgrad mit Einschluß dieser Verluste.

§ 35.

Für Generatoren, synchrone Motoren und Transformatoren ist der Wirkungsgrad unter Voraussetzung von Phasengleichheit zwischen Strom und Spannung anzugeben.

§ 36.

Bei Maschinen mit besonderen Erregermaschinen ist der Wirkungsgrad beider Maschinen getrennt anzugeben.

Methoden zur Bestimmung des Wirkungsgrades.

§ 37.

Die direkte elektrische Methode. Diese Methode kann angewendet werden bei Motorgeneratoren, Umformern und Transformatoren, indem man die abgegebene sowie zugeführte Leistung durch elektrische Messungen ermittelt. Zwecks Verwendung gleichartiger Meßinstrumente empfiehlt es sich bei dieser Methode, gleichartige Maschinen oder Transformatoren zu prüfen.

§ 38.

Die indirekte elektrische Methode. Sind zwei Maschinen gleicher Leistung, Type und Stromart vorhanden, so werden sie mechanisch und elektrisch derart gekuppelt, daß die eine als Generator, die andere als Motor läuft. Der Betrieb des Systems erfolgt durch Stromzuführung von einer äußeren Stromquelle aus in der Weise, daß nur die zur Deckung der Verluste nötige Leistung zugeführt und gemessen wird. Der Betriebszustand der beiden Maschinen ist so einzuregulieren, daß der Mittelwert zwischen der dem Motor zugeführten und der vom Generator abgegebenen Leistung so nahe als möglich gleich ist der normalen Leistung der einzelnen Maschine. Dieser Mittelwert wird durch Messung bestimmt. Die zur Deckung der Verluste nötige Leistung kann auch mechanisch zugeführt und elektrisch gemessen werden. Ist bei diesen Messungen Riemenübertragung nicht zu vermeiden, so sind die dadurch verursachten Verluste entsprechend zu berücksichtigen.

Die vorstehend beschriebene Methode ist auch bei Transformatoren anwendbar, sofern dieselben in bezug auf Leistung, Spannung und Frequenz identisch sind. Der in etwaigen Hilfsapparaten entstehende Verlust ist sinngemäß zu berücksichtigen.

§ 39.

Die direkte Bremsmethode. Diese Methode ist im allgemeinen bei kleineren Motoren brauchbar, kann aber für einen kleineren Generator, der sich als Motor betreiben läßt, auch verwendet werden, doch müssen dann die Verhältnisse so gewählt werden, daß die magnetische und mechanische Beanspruchung, Tourenzahl und Leistung während der Prüfung möglichst wenig von den entsprechenden Größen bei der Benutzung als Generator abweichen.

§ 40.

Die indirekte Bremsmethode. Ist ein Generator bzw. Motor von entsprechender Leistung vorhanden, dessen Wirkungsgrad bei verschiedenen Belastungen genau bekannt ist, so kann dieser als Bremse bzw. als Antriebmotor benutzt werden.

Wird hierbei eventuell eine Riemenübertragung verwendet, so ist der dadurch entstehende Verlust zu berücksichtigen.

§ 41.

Leerlaufmethode. Bei Leerlauf als Motor wird der Verlust, welcher zum Betriebe der Maschine bei normaler Tourenzahl und Feldstärke in eingelaufenem Zustande auftritt, bestimmt. Dieser stellt den durch Luft-, Lager- oder Bürstenreibung, Hysterese und Wirbelströme bedingten Verlust dar, dessen Änderung mit der Belastung nicht berücksichtigt wird. Durch elektrische Messungen und Umrechnungen wird der Verlust durch Stromwärme in Feld-, Anker-, Bürsten- und Übergangswiderstand bei entsprechender Belastung ermittelt, wobei bezüglich des letzteren auf die Bewegung und die richtige Stromstärke, bezüglich der ersteren auf den warmen Zustand der Maschine Rücksicht zu nehmen ist. Bei asynchronen Motoren können die Verluste im Sekundäranker anstatt durch Widerstandsmessungen durch Messung der Schlüpfung bestimmt werden. Ein etwaiger bei normalem Betriebe in einem Vorschaltwiderstand für die Feldwickelung auftretender Verlust ist mit in Rechnung zu ziehen. Diese Methode ist auch sinngemäß für Transformatoren verwendbar.

Die Summe der vorstehend erwähnten Verluste wird als „meßbarer Verlust" bezeichnet. Als Wirkungsgrad wird angesehen das Verhältnis der Leistung zur Summe von Leistung und „meßbarem Verlust".

§ 42.

Hilfsmotormethode. Stellen sich der direkten Ermittelung des Verlustes für Luft-, Lager- und Bürstenreibung sowie Hysterese und Wirbelströme in gewissen Fällen Schwierigkeiten entgegen, oder ist eine gleichartige Stromquelle, wie die zu untersuchende Maschine nötig hat, nicht vorhanden, so kann der Verlust für Luft- und Lagerreibung sowie Hysterese und Wirbelströme durch einen Hilfsmotor festgestellt werden. Die Feststellung des Verlustes für Luft-, Lager- und Bürstenreibung sowie Hysterese und Wirbelströme der zu untersuchenden Maschine hat dann dadurch zu geschehen, daß man die dem antreibenden Motor zugeführte Leistung bei normaler Erregung der zu untersuchenden Maschine feststellt und davon die im Hilfsmotor sowie die in der event. Riemenübertragung entstehenden Verluste abzieht. Die Verluste im Hilfsmotor sind durch Leerlauf des Hilfsmotors bei gleicher Tourenzahl und Spannung wie während des ersten Versuches festzustellen, sowie durch die Belastung hinzukommende Verluste in Feld-, Anker-, Bürsten- und Übergangswiderstand durch elektrische Messungen entsprechend den Angaben unter § 41 zu bestimmen. Im übrigen ist bezüglich der zu untersuchenden Maschine genau wie in § 41 zu verfahren und ist auch der Wirkungsgrad in gleicher Weise definiert.

Als Hilfsmotor kann auch die Antriebsdampfmaschine verwendet werden, wenn sie von der Dynamo abkuppelbar ist. Die Ermittelung muß dann in der Weise vorgenommen werden, daß zuerst die Dampfmaschine einschließlich unbelastetem Generator mit normaler Tourenzahl und Erregung und dann, wieder nachdem die Kuppelung gelöst ist, die Dampfmaschine allein indiziert wird. Die Differenz zwischen beiden ist als Leerlaufsverlust für Luft-, Lager- und Bürstenreibung sowie für Hysterese und Wirbelströme zu betrachten, wobei auf etwaige gleichzeitig von der Dampfmaschine erzeugte Erregung Rücksicht zu nehmen ist. Wegen der den Leerlaufdiagrammen anhaftenden Ungenauigkeit ist diese Methode mit besonderer Vorsicht zu verwenden.

§ 43.

Indikatormethode. Wird der Generator durch eine Dampfmaschine direkt angetrieben und ist er nicht abkuppelbar, so ist der Wirkungsgrad ohne Rücksicht auf Reibung zu bestimmen. Die bei Leerlauf auftretenden Hysterese- und Wirbelstromverluste sind bei normaler Tourenzahl und Klemmenspannung mit Indikatordiagrammen derart zu bestimmen, daß die Dampfmaschine bei erregtem und unerregtem Felde indiziert wird. Wird die Erregung von der gleichen Dampfmaschine geliefert, so ist die dafür benötigte Leistung in Abzug zu bringen. Die verbleibende Differenz wird als der durch Hysterese und Wirbelstrom bei Leerlauf erzeugte Verlust angesehen, dessen Änderung mit der Belastung nicht berücksichtigt wird. Durch elektrische Messungen und Umrechnungen wird der Verlust durch Stromwärme in Feld, Anker, Bürsten und deren Übergangswiderstand bei Belastung ermittelt, wobei bezüglich des letzteren auf die Bewegung und die richtige Stromstärke, bezüglich der ersteren auf den warmen Zustand der Maschine Rücksicht zu nehmen ist. Ein etwaiger bei normalem Betriebe in einem Vorschaltwiderstand für die Feldwickelung

auftretender Verlust ist mit in Rechnung zu ziehen. Die Summe der vorstehend erwähnten Verluste wird als „meßbarer Verlust" bezeichnet. Als Wirkungsgrad wird das Verhältnis der Leistung zur Summe von Leistung und „meßbarem Verlust" angesehen. Wegen der den Leerlaufdiagrammen anhaftenden Ungenauigkeit ist diese Methode mit besonderer Vorsicht zu verwenden.

§ 44.

Trennungsmethode. Bei Maschinen, die nur unter Benutzung von fremden Lagern arbeiten können, ist der Wirkungsgrad ohne Rücksicht auf Reibung in folgender Weise zu bestimmen. Der Verlust für Hysterese und Wirbelströme wird elektrisch festgestellt dadurch, daß die Maschine in ähnlicher Weise wie bei der Leerlaufsmethode, als Motor laufend, untersucht wird. Um den Verlust für Luft-, Lager- und Bürstenreibung von dem Verlust für Hysterese und Wirbelströme trennen zu können, ist in folgender Weise zu verfahren: Die Maschine muß bei mehreren verschiedenen Spannungen mit normaler Tourenzahl in eingelaufenem Zustande untersucht werden, und zwar soll man mit der Spannung so weit wie möglich nach unten gehen, jedoch auch Beobachtungswerte bei normaler Spannung und wenn möglich bei 25 % höherer Spannung aufnehmen. Diese Beobachtungswerte sind graphisch aufzutragen, und es ist die erhaltene Kurve so zu verlängern, daß der bei der Spannung „null" auftretende Verlust ermittelt werden kann. Dieser Wert gibt den Reibungsverlust an und ist von dem bei normaler Spannung beobachteten Leerlaufsverlust in Abzug zu bringen. Der Rest ist als Verlust für Hysterese und Wirbelströme anzusehen, dessen Änderung mit der Belastung nicht berücksichtigt wird. Die übrigen Verluste sind entsprechend § 41 elektrisch zu ermitteln. Die Summe von Hysterese- und Wirbelstromverlust, sowie die Verluste durch Stromwärme in Feld, Anker, Bürsten und deren Übergangswiderstand bei Belastung werden als „meßbarer Verlust" bezeichnet, und wird als der Wirkungsgrad das Verhältnis der Leistung zur Summe von Leistung und „meßbarem Verlust" angesehen.

Die Ermittelung des Hysterese- und Wirbelstromverlustes kann auch mittels Hilfsmotor vorgenommen werden.

Spannungsänderung.

§ 45.

Unter Spannungsänderung des Wechselstromgenerators ist die Änderung der Spannung zu verstehen, welche eintritt, wenn man bei normaler Klemmenspannung den höchsten auf dem Leistungsschild verzeichneten Ankerstrom abschaltet, ohne Tourenzahl und ohne Erregerstrom zu ändern.

§ 46.

Bei Maschinen, welche nur für induktionslose Belastung bestimmt sind, genügt die Angabe der Spannungsänderung für letztere. Bei Maschinen, welche für induktive Belastung bestimmt sind, ist außer der Spannungsänderung für induktionslose Belastung noch die Spannungsänderung anzugeben bei einer induktiven Belastung, deren Leistungsfaktor 0,8 ist. Die Angabe der Spannungsänderung für einen anderen Leistungsfaktor ist außerdem zulässig.

§ 47.

Sollen Gleichstrommaschinen auf Spannungsänderung geprüft werden, so gilt Folgendes: Gleichstrommaschinen mit Nebenschlußerregung, mit gemischter Erregung und mit Fremderregung werden ohne Nachregulierung der Erregung von Vollbelastung bei normaler Spannung bis hinab auf Leerlauf bei gleichbleibender normaler Tourenzahl in wenigstens vier annähernd gleichen Abstufungen der Belastung geprüft. Der Unterschied zwischen der größten und der kleinsten beobachteten Spannung gilt als Spannungsänderung. Bezüglich Verstellung der Bürsten gilt das für den Betrieb Vereinbarte.

§ 48.

Bei Transformatoren ist sowohl der Ohmsche Spannungsverlust als auch die Kurzschlußspannung bei normaler Stromstärke anzugeben, beides auf den Sekundärkreis bezogen. Der Ohmsche Spannungsverlust gilt als Spannungsänderung bei

induktionsloser Belastung, die Kurzschlußspannung als Spannungsänderung bei induktiver Belastung.

Es ist zulässig, den Versuch bei einer von der normalen nicht allzusehr abweichenden Stromstärke zu machen; die Spannungsänderungen müssen dann aber auf normale Stromstärke proportional umgerechnet werden.

Anhang.

Es empfiehlt sich, bei Neuanlagen und in Preislisten die folgenden Werte für Frequenz, Tourenzahl und Spannung möglichst zu berücksichtigen.

Die Frequenz soll 25 oder 50 sein.

Die Tourenzahl bei Wechselstrom- und Drehstrommaschinen soll nach folgender Tabelle abgestuft werden.

Polzahl	Tourenzahl des Generators, Synchronmotors oder leerlaufenden Asynchronmotors bei Frequenzen von	
	25	50
2	1500	3000
4	750	1500
6	500	1000
8	375	750
10	300	600
12	250	500
16	187,5	375
20	150	300
24	125	250
28	107	214
32	94	187,5
36	83	166
40	75	150
48	—	125
56	—	107
64	—	94
72	—	83
80	—	75

Die Spannung soll folgender Tabelle entsprechen:

Wechselstrom bzw. Drehstrom.

Motor oder Primärklemmen des Transformators V	Generator oder Sekundärklemmen des Transformators V
110	115
220	230
500	525
1000	1050
2000	2100
3000	3150
5000	5250

B. Wechselstromerzeuger.

77. Allgemeines.

Als Wechselstromerzeuger kommen praktisch überwiegend Wechselstromdynamos mit gesonderter Gleichstromerregung in Betracht. Hieraus ergibt sich, daß zur Untersuchung ihres Verhaltens und zur Ermittelung ihrer charakteristischen Größen im allgemeinen mehrere Meßgruppen in Zusammenhang miteinander arbeiten, und deshalb folgendes möglichst gleichzeitig beobachtet werden muß:

1. Der Beobachtungsstromkreis zur Ermittelung der Klemmenspannung $\tilde{E}_k$ nach Größe und Kurvenform.
2. Der Arbeitsstromkreis zur Feststellung der Belastungsverhältnisse in Gestalt der Stromstärke $\tilde{J}$ und des Leistungsfaktors ($\cos \varphi$).
3. Der Erregerstromkreis zur Ermittelung der wirksamen Erregerstromstärke $\overline{J}_\mu$ bzw. der MMK in AW.
4. Der Antrieb durch Messung der Tourenzahl n des Erzeugers, nötigenfalls einschließlich des Ungleichförmigkeitsgrades und der dem Wechselstromerzeuger zugeführten mittleren Leistung in mechanischer Form.

Die große Mannigfaltigkeit, welche durch die verhältnismäßig erhebliche Zahl von Variablen bedingt wird, läßt zur besseren Übersicht und zur Verminderung der erforderlichen Anzahl von gleichzeitigen Beobachtern eine möglichste Trennung der Untersuchungen erwünscht erscheinen. Man wird daher meist nicht alle Größen auf einmal ermitteln, sondern, soweit angängig, eine Reihenschaltung bei ihrer Untersuchung vorziehen und etwa die Wirkungsgradbestimmung für sich, die Kurvenformermittelung für sich und die Feststellung des Spannungsabfalls für sich vornehmen. Hieraus werden sich bereits Vereinfachungen in den oben angeführten Beobachtungsanforderungen ergeben, etwa in der Art, daß bei Aufstellung der $\tilde{E}, \tilde{J}$-Kurven oder Charakteristiken der Beobachtungsstromkreis (1) sich nur auf ein Voltmeter zur Messung der effektiven Klemmenspannung $\tilde{E}_k$ beschränkt und vom Antrieb (4) nur die Tourenzahl n durch ein Tachometer kontrolliert bzw. gemessen wird. Aber auch dann ist die Zahl der Variablen noch so groß, daß zur Vermeidung von Irrungen in der Auslegung der Meßgrößen eine gesonderte Untersuchung des Einflusses der einzelnen Variablen auf die jeweilige Aufgröße erfolgen muß.

Man wird somit zur Klarstellung eines derartigen Zusammenhanges zwischen physikalischen Größen in ganz entsprechender Weise wie in der Mathematik verfahren. Um also etwa den Zusammenhang zwischen der Klemmenspannung $\tilde{E}_k$ als der abhängigen Veränderlichen mit den übrigen Größen, wie Tourenzahl n, Erregerstromstärke $\overline{J}_\mu$ und verschiedener Belastung, als den unabhängigen Veränderlichen, eindeutig zu ermitteln, wird man schrittweise vorgehen, so, daß man nacheinander den Zusammenhang zwischen der abhängigen Veränderlichen (y) und einer unabhängigen Veränderlichen (x) untersucht, während man alle übrigen (z, u, v) entweder auf einem endlichen Wert konstant hält, oder Null werden läßt. Entsprechend würde man mit den übrigen unabhängigen Veränderlichen zu verfahren haben.

Gewöhnlich pflegt man den Zusammenhang zwischen den untersuchten Größen graphisch, d. h. in Form von Schaulinien (x, y-Kurven) darzustellen, da diese nicht nur weit übersichtlicher sind als die unmittelbar erhaltenen

Zahlentabellen, sondern auch gleichzeitig die graphische Interpolation (vgl. II. 1 in 5) ermöglichen. Zu bemerken ist allerdings, daß man gut tut, nicht nur jene interpolierten Kurven anzuführen, wie dies leider sehr häufig geschieht, sondern auch, oder vielmehr in erster Linie die unmittelbar beobachteten Punkte einzutragen, um dem Leser oder Beschauer auch die erforderliche Kritik zu ermöglichen und seinen Schlüssen nicht mehr als nötig vorzugreifen, namentlich wenn es sich um Extrapolationen handelt, die sonst als solche zu schwer kenntlich sind. Meist ist es üblich, bei jenen Schaulinien oder Charakteristiken die unabhängige Veränderliche als Abszisse, die als abhängig zu kennzeichnende Veränderliche als Ordinate zu wählen.

a) Spannungsverhältnisse.

78. Tabelle der Charakteristiken und Schaltungsanordnung.

Wendet man diese Überlegung auf die Verhältnisse beim Wechselstromgenerator an, und zwar zunächst auf die Spannungscharakteristiken, so kämen für die Klemmenspannung ($\tilde{E}_k$) als abhängige Veränderliche nicht nur die Tourenzahl n, bzw. Periodenzahl u, und der Erregerstrom $\bar{J}_\mu$ als unabhängige Veränderliche in Betracht, sondern auch die Belastungsstromstärke $\tilde{J}$ und der Leistungsfaktor ($\cos\varphi$). Unterscheidet man beim letzteren noch φ_s bei Selbstinduktion im äußeren Stromkreis, also verzögertem $\tilde{J}$ gegenüber $\tilde{E}_k$, und φ_c bei resultierender Kapazität, also voreilendem $\tilde{J}$ gegenüber $\tilde{E}_k$, so erhält man etwa folgendes Schema für die folgenden Untersuchungsreihen zur Aufstellung der Charakteristiken, welche für die Spannungsverhältnisse von Wichtigkeit sind:

Tabelle I.

Nr.	n bzw. u	$\bar{J}_\mu$	$\tilde{J}$	$\cos\varphi$	$\tilde{E}_k$	Bezeichnung
1	veränderlich	konstant	0	—	**veränderlich**	Tourenzahl-charakteristik.
2	konstant z. B. $u = 50$	veränderlich	0	—	**veränderlich**	Leerlauf-charakteristik.
3a	„	konstant	veränderlich	konstant z. B. $\cos\varphi = 1$	**veränderlich**	äußere Charakteristiken (bei verschiedenen Werten des Leistungsfaktors).
3b	„	„	„	konstant < 1 z. B. $\cos\varphi_s = 0{\cdot}8$	**veränderlich**	
3c	„	„	„	konstant < 1 z. B. $\cos\varphi_c = 0{\cdot}8$	**veränderlich**	
4a	„	veränderlich	konstant	konstant $= 1$	**veränderlich**	Belastungs-charakteristiken (bei verschiedenen Werten des Leistungsfaktors).
4b	„	„	„	konstant < 1 z. B. $\cos\varphi_s = 0$	**veränderlich**	
4c	„	„	„	konstant < 1 z. B. $\cos\varphi_c = 0$	**veränderlich**	
5	„	„	**veränderlich**	—	0	Kurzschluß-charakteristik.
6a	„	**veränderlich**	veränderlich	konstant $= 1$	konstant	Regulierungs-kurven (bei verschiedenen Werten des Leistungsfaktors).
6b	„	**veränderlich**	„	konstant < 1 z. B. $\cos\varphi_s = 0$	„	
6c	„	**veränderlich**	„	konstant z. B $\cos\varphi_c = 0$	„	

In der vorstehenden Tabelle I ist diejenige veränderliche Größe, welche die Bezeichnung der charakteristischen Kurve bedingt und die Ordinaten (y)

zu der anderen veränderlichen Größe (x) jeder Reihe liefert, durch fetteren Druck hervorgehoben (**Aufgröße**).

Neben diesen Charakteristiken der fertig montierten und normal laufenden Maschine sind für besondere Zwecke noch andere von Interesse, so z. B. für den Konstrukteur zur Ermittelung der Ankerstreureaktanz (vgl. Hdb. V in B 6) die Aufnahme der „Luftcharakteristik“, d. i. der aufzudrückenden Spannung $\tilde{E}$ für die Erzeugung der Stromstärken $\tilde{J}$ in der Ankerwickelung bei entferntem Magnetrad. Weiteres über diese $\tilde{E}, \tilde{J}$-Kurve, deren Ermittelung nach der in **16** angegebenen Meßanordnung zur Bestimmung resultierender Selbstinduktionskoeffizienten erfolgt, sowie über ihre Verwertung in Richtung der Konstruktion und Theorie siehe Hdb. V a. a. O.

Als Meßanordnung, zur Aufstellung der unter 1 bis 6 angeführten Charakteristiken, wäre etwa die in Fig. 164 angegebene zu wählen. Der durch V regulierbare Erregerstrom $\bar{J}_\mu$ wird durch zwei Schleifringe dem Wechselstromerzeuger zugeführt, dessen Tourenzahl n durch ein Tachometer gemessen wird, woraus die sekundliche Periodenzahl zu $p \cdot \frac{n}{60}$ sich rechnet, wenn p die Polpaarzahl des Erzeugers bezeichnet. An die Klemmen 1 und 2 ist ein Voltmeter oder eine der in **4** angeführten Meßvorrichtungen zur Messung der Spannung $\tilde{E}_k$ angeschlossen (vgl. hierzu auch Hdb. IV Seite 72, bzw. 86 in Aufl. 2), während die Belastung für die Versuchsreihen 3_a bis 6_c durch Einschalten des Arbeitsstromkreises mit Hilfe des (im Schema der Übersichtlichkeit wegen nur einpolig angedeuteten) Schlüssels S erfolgt, durch Wahl des regulierbaren Ausgleichwiderstandes zwischen A und B eingestellt und durch Amperemeter und Wattmeter hinsichtlich Größe ($\tilde{J}$) und Leistungsfaktor ($\cos\varphi$) gemessen wird. Anstelle des Wattmeters könnte natürlich auch ein direkt zeigender Phasenmesser treten, der zur rascheren Einregulierung eines bestimmten Leistungsfaktors ($\cos\varphi_s$) bzw. ($\cos\varphi_c$) gewisse Vorteile besitzt. Bei der in Fig. 164 angegebenen Schaltung wäre als Schaltungskorrektion (**63**) zu der Angabe des Wattmeters noch der Wattverbrauch des Voltmeters und die Hauptstromkreiskorrektion ($\tilde{J}^2 R_H$) hinzuzufügen, um die volle elektrische Leistung des Erzeugers zu erhalten.

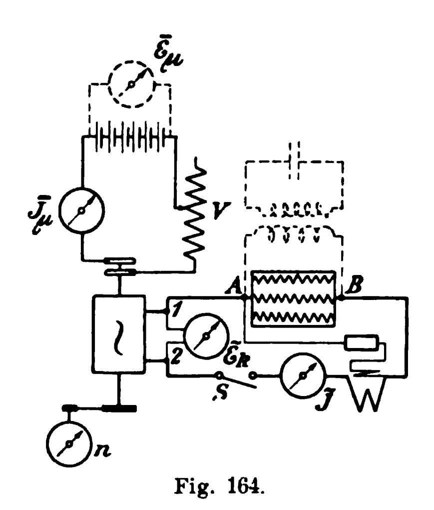


Fig. 164.

Die Belastung zwischen A und B kann bei 3_a, 4_a und 6_a, d. h. für $\cos\varphi = 1$, entweder durch Glühlampen, oder für höhere Generatorspannungen und Leistungen mit Hilfe eines Wasserwiderstandes erfolgen (siehe hierzu in **81**, ferner Fig. 176, sowie I, 2 in **261**). Kleinere Leistungsfaktoren als 1 wird man durch eine der beiden folgenden Anordnungen erhalten können: Parallel zu jener Belastung schaltet man noch einen geeigneten Transformator, den man sekundär entweder mit einem geeigneten induktiven Widerstand (Drosselspule, Motor) belastet, oder, um Voreilung zu erhalten, mit einer Kapazität (Aluminiumzellen für Niederspannung, Hochspannungskabel für Hochspannung), wie in Fig. 164 strichliert angedeutet. Die Er-

reichung eines gewünschten Leistungsfaktors ($\cos\varphi$), der für verschiedene $\tilde{J}$ stets denselben konstanten Betrag, z. B. 0·8 besitzt, wird bei dieser Anordnung aber gewöhnlich Schwierigkeiten machen, die man jedoch durch das in **82** angegebene Verfahren der Ableitung aus den Kurven der Fig. 166 für beliebige $\cos\varphi$ überwinden kann, falls man sich nicht nur auf die praktisch wichtigere Untersuchung von $\tilde{E}_k$ bei induktiver Belastung beschränkt, bei welcher die Einregulierung auf ein bestimmtes $\cos\varphi$ durch Mischung aus induktionsfreier Belastung und einer verstellbaren Drosselspule leichter zu bewerkstelligen ist. Am besten gelangt man aber mit der Einregulierung auf ein bestimmtes $\cos\varphi$ zum Ziel, wenn man als Belastung AB (entweder allein oder nebenbei) einen Synchronmotor verwenden kann, bei welchem man den gewünschten Leistungsfaktor durch Veränderung der Erregung sehr bequem und innerhalb weiter Grenzen einstellen kann. Im einzelnen ist zur Durchführung der 6 Versuchsreihen und der Deutung der Ergebnisse noch folgendes zu bemerken:

1. Abhängigkeit der Klemmenspannung $\tilde{E}_k$ von der Tourenzahl n.

79. Tourenzahl-Charakteristik.

Wird der Erregerstrom J_u konstant gehalten, der Arbeitsstromkreis bei S (Fig. 164) geöffnet, d. h. $\tilde{J} = o$ gemacht und nun $\tilde{E}_k$ bei verschiedenen Tourenzahlen n bzw. Periodenzahlen $u = \frac{n \cdot p}{60}$ beobachtet, so wird $\tilde{E}_k$ praktisch mit der induzierten EMK $\tilde{E}_o$ des Erzeugers zusammenfallen, vorausgesetzt, daß der Stromverbrauch der Meßvorrichtung für $\tilde{E}_k$ vernachlässigbar klein ist gegenüber der Normalstromstärke, somit weder einen merklichen Spannungsabfall in der Ankerwickelung, noch eine nachweisbare Ankerreaktion bedingt. Nach der Gleichung:

$$\tilde{E}_o = c_e \cdot u \cdot N_2 \cdot S_2 \cdot 10^{-8} = n \cdot \left(\frac{p}{60} \cdot c_e \cdot N_2 \cdot S_2 \cdot 10^{-8}\right) \text{ Volt}$$

wäre wegen der Konstanz des Klammerausdruckes, nämlich der Polpaarzahl p, des Feld- oder Kurvenfaktors c_e, der mit $\overline{J}_u$ veränderlichen Ankerfeldstärke N_2 und der induzierten Leiterzahl S_2, völlige Proportionalität zwischen $\tilde{E}_o$ und der Tourenzahl n bzw. Periodenzahl u zu erwarten, d. h. die $\tilde{E}_o$, n-Charakteristik müßte eine Gerade bilden, welche durch den Anfangspunkt des Koordinatenstystems mit $\tilde{E}_o$ als Ordinaten und n als Abszissen geht.

Findet man nun bei der Untersuchung, daß jene $\tilde{E}_o$, n-Charakteristik eine schwachgekrümmte Kurve liefert, die mit wachsenden Werten von n bzw. u immer mehr unterhalb jener Geraden der einfachen Theorie zurückbleibt, so deutet dies auf den mit u wachsenden Einfluß von Wirbelströmen der untersuchten Erzeugerkonstruktion, die in den nicht genügend unterteilten Metallmassen entweder der Armatur, oder der Feldmagnete ihren Sitz haben und schwächend auf die resultierende Felderregung wirken, d. h. die resultierende wirksame Kraftlinienzahl N_2 mit zunehmendem n bzw. u vermindern. In unzerteilten Feldmagnetköpfen kann dies namentlich dann leicht eintreten, wenn der magnetische Widerstand jedes aus zwei Polen und dem jeweils zugehörigen Armaturstück gebildeten magnetischen Kreislaufes sich während einer Periode stark ändert, z. B. infolge von Vorsprüngen oder Zähnen der Armatur, so daß ein Springen der Kraftliniendichte eintritt und weiterhin Wirbelströme

in nicht unterteilten Metallmassen, zu deren Auffindung bzw. Beseitigung das Ergebnis jener Versuchsreihe beizutragen hätte.

2. Aufstellung der Leerlaufcharakteristik oder $\tilde{E}_o, \bar{J}_u$-Kurve.

80. Leerlaufcharakteristik.

Werden die unter 1 angeführten Meßvorrichtungen beibehalten, aber bei der Versuchsreihe die Tourenzahl n bzw. Periodenzahl u konstant gehalten, etwa auf dem Normalwert $u = 50 = p \cdot \frac{n}{60}$, hingegen der Erregerstrom $\bar{J}_u$ von Null bis zu seinem Maximalwert variiert und die beobachteten Spannungen $\tilde{E}_k = \tilde{E}_o$ als Ordinaten zu jenen Werten von $\bar{J}_u$ (als Abszissen) aufgetragen, so erhält man die sogenannte Leerlaufcharakteristik oder Magnetisierungskurve der untersuchten Maschine, welche für die mittelbare Gewinnung des Spannungsabfalls (siehe in 82 und Fig. 168) notwendig ist. Aus der unter 1 angeführten Kraftliniengleichung

$$\tilde{E}_o = c_e \cdot u \cdot N_2 \cdot S_2 \cdot 10^{-8} = N_2 \left(\frac{n}{60} \cdot p \cdot c_e \cdot S_2 \cdot 10^{-8} \right) \text{ Volt}$$

folgt bei Hinzunahme des magnetischen Ausgleichgesetzes, wonach

$$N_2 = \frac{1{\cdot}257 \cdot \bar{J}_u \cdot w}{\frac{(l)_m}{(q)_m \cdot \mu_g} \cdot \nu} = \mu_g \cdot \bar{J}_u \cdot \frac{1}{\nu} \left[\frac{1{\cdot}257 \cdot w \cdot (q)_m}{(l)_m} \right] = \mu_g \cdot \bar{J}_u \cdot \frac{1}{\nu} \cdot C_m,$$

die Beziehung

$$\tilde{E}_o = \bar{J}_u \cdot \mu_g \cdot \frac{1}{\nu} \cdot C_m \left(\frac{n}{60} \cdot p \cdot c_e \cdot S_2 \cdot 10^{-8} \right) \text{ Volt}$$

N_2 hängt sonach außer von C_m, einer Maschinenkonstanten, welche die Anzahl w der Erregerwindungen für jeden magnetischen Kreislauf, sowie dessen mittlere Länge $(l)_m$ und mittleren Querschnitt $(q)_m$ enthält, noch von dem Streuungskoeffizient $\nu = \frac{N_1}{N_2}$, von der unabhängigen Veränderlichen $\bar{J}_u$ und der von $\bar{J}_u$ abhängigen Veränderlichen μ_g ab, d. i. der gemischten Permeabilität des aus Eisen und Luft bestehenden magnetischen Kreislaufs. Diese Beziehung für $\tilde{E}_o$ gestattet folgende Schlüsse über den Charakter der $\tilde{E}_o, \bar{J}_u$-Kurve zu ziehen: Für einen konstanten Wert von ν und μ_g müßte jene Kurve in eine Gerade übergehen, und sie wird um so weniger von der Geraden abweichen, je unabhängiger innerhalb des Meßbereiches ν und μ_g von J_u sind. Vielfach wird dies bei der unbedeutenden Änderung von ν damit zusammenfallen, daß μ_g um so weniger auch bei den höheren Werten von $\bar{J}_u$ bzw. $\tilde{E}_o$ von der Konstanz abweicht, je geringer der magnetische Widerstand des Eisenweges gegenüber demjenigen der „Luft" ist.

Gegenüber den Verhältnissen bei 1 ist zu bemerken: Die Annahme, daß n konstant gehalten wird, ist praktisch nicht so leicht erfüllbar, wie dort die Annahme, daß $\bar{J}_u$ bzw. N_2 konstant gehalten wird, da es sich bei n um eine dynamische Größe der Mechanik handelt. Vielfach werden kleine Abweichungen des n-Wertes von dem Normalwert im Augenblick der Beobachtung nicht zu vermeiden sein. Um diese zu berücksichtigen, hat eine Korrektur des beobachteten Spannungswertes $\tilde{E}$ zu erfolgen in Gestalt der Multiplikation von $\tilde{E}$ mit dem Verhältnis der normalen zur beobachteten Tourenzahl.

3. Aufstellung der äußeren Charakteristiken oder $\tilde{E}_k, \tilde{J}$-Kurven.

81. Äußere Charakteristiken. Aufnahmen bei konstantem Leistungsfaktor.

Für den Betrieb außerordentlich wichtig ist bei allen Parallelschaltungsanlagen der Spannungsabfall ε der Wechselstromerzeuger bei veränderlicher Belastung. Da dies einen wesentlichen Punkt der Garantien zu bilden pflegt, so wird diesem Spannungsabfall sowohl der Konstrukteur bei der Vorausberechnung, als auch der Meßtechniker bei der empirischen Feststellung der erreichten Beträge große Aufmerksamkeit zu widmen haben. Diejenige Kurve, welche den Zusammenhang der entnommenen Stromstärke $\tilde{J}$ mit der verfügbaren Klemmenspannung $\tilde{E}_k$ einer als Erzeuger arbeitenden Dynamo bei konstanter (normaler) Tourenzahl n und bei konstant gehaltenem Erregerstrom $\bar{J}_u$ darstellt, pflegt man für gewöhnlich kurzweg als ihre Charakteristik zu bezeichnen, oder als äußere Charakteristik im Gegensatz zu der inneren, welche unter denselben Verhältnissen den Zusammenhang zwischen der wirklich induzierten EMK ($\tilde{E}_i$) und dem Arbeitsstrom $\tilde{J}$ angibt. In der Regel wird aber nur $\tilde{E}_k$ der Beobachtung unmittelbar zugänglich sein, d. h. $\tilde{E}_i$ eine gerechnete Größe darstellen, deren Abweichung von $\tilde{E}_o$ durch die Ankerreaktion bedingt wird, es müßte denn sein, daß man neben der Arbeitswickelung eine eigene Hilfswickelung zur Messung von $\tilde{E}_i$ aufbringt, bei der der Spannungsabfall $\varepsilon' = \tilde{E}_i - \tilde{E}_k'$ bis zu der Meßspannung $\tilde{E}_k'$ an den äußeren Enden der Hilfswickelung infolge einer sehr klein gewählten Meßstromstärke vernachlässigbar wird.

Im allgemeinen wird der Spannungsabfall $\varepsilon = \tilde{E}_o - \tilde{E}_k$ als Unterschied zwischen den beiden Beobachtungswerten $\tilde{E}_o$ und $\tilde{E}_k$ bei gleichen Werten von n und $\bar{J}_u$ sich bei Wechselstromerzeugern — im Gegensatz zu den Gleichstromerzeugern — aus 3 geometrisch oder vektoriell zusammengesetzten Komponenten bilden, nämlich aus $\varepsilon_R = \tilde{J} \cdot \bar{R}_a$ als dem Ohmschen Spannungsabfall in der Ankerwickelung — richtigerweise muß auch hier der Wechselstromwert $\tilde{R}_a$ eingesetzt, d. h. $\varepsilon_R = \tilde{J} \cdot \tilde{R}_a$ gebildet werden, da auf Grund der Oberflächenwirkung eine merkliche Erhöhung von $\tilde{R}_a$ gegenüber $\bar{R}_a$ eintreten wird, so daß $\tilde{R}_a$ etwa 1·5 bis 2·0 $\bar{R}_a$ zu setzen ist (siehe hierüber E. Arnold, Die Wechselstromtechnik Bd. IV, 1904 bei J. Springer, Seite 129) — aus der Reaktanzspannung $\varepsilon_L = \tilde{J} \cdot \omega_i \cdot \tilde{L}_a$, als dem selbstinduktiven Spannungsabfall, der durch den Mangel an Zwangläufigkeit in der elektromagnetischen Verkettung (Streuung der Ankerfeldkraftlinien) bedingt wird, und endlich aus einer fiktiven Komponente ε_γ, als dem reaktiven Spannungsabfall, der aus der Verkleinerung der resultierenden AW_r gegenüber den ohne Ankerstrom wirkenden AW_h der Erregerwickelung allein folgt, und stark von dem Sättigungsgrade, d. i. der Gegend der Magnetisierungskurve der Maschine abhängt. Weiteres über die Theorie der Wechselstromerzeuger und über die Verwertung der experimentell ermittelten Werte, namentlich des gesamten Spannungsabfalls ε in Richtung jener Komponenten und Teilwerte siehe in Bd. IV und V, oder auch E. Arnold, Die Wechselstromtechnik Bd. IV (1904 bei J. Springer, Berlin); vgl. auch in **84** bei der mittelbaren Feststellung von ε oder der Belastungskurven aus der Leerlaufkurve.

Die Abhängigkeit aller Komponenten des ε von der Richtung der Stromstärke im Polardiagramm läßt sofort erkennen, daß zur Eindeutigkeit von ε oder der $\tilde{E}_k, \tilde{J}$-Kurve neben der Konstanz von n und $\bar{J}_u$, als den Ursachen des Ausgangswertes $\tilde{E}_o$, auch noch die Konstanz des Leistungsfaktors ($\cos\varphi$)

des Wechselstromerzeugers gehört. Hieraus ergibt sich im allgemeinen die Notwendigkeit, in den Arbeitsstromkreis (siehe Fig. 164) außer einem Amperemeter zur Messung der Stromstärke $\tilde{J}$ noch einen Meßapparat zur Feststellung des Leistungsfaktors einzuschalten, wozu entweder ein Wattmeter, wie in Fig. 164 angegeben, oder auch ein Phasenmesser geeignet ist. Eine solche Meßvorrichtung kann nur dann entbehrt werden, wenn es sich allein um die äußere Charakteristik bei induktions- und kapazitätsfreier Belastung handelt und diese mit hinreichender Sorgfalt ausgewählt wird, so daß $(\cos\varphi)$ sich nur unmerklich von 1 entfernt, wie dies außer bei geeigneten Drahtwiderständen auch noch bei Glühlampenbelastung, oder für Hochspannungsgeneratoren bei Wasserwiderständen ausreichend der Fall ist (I, 2 in **261**).

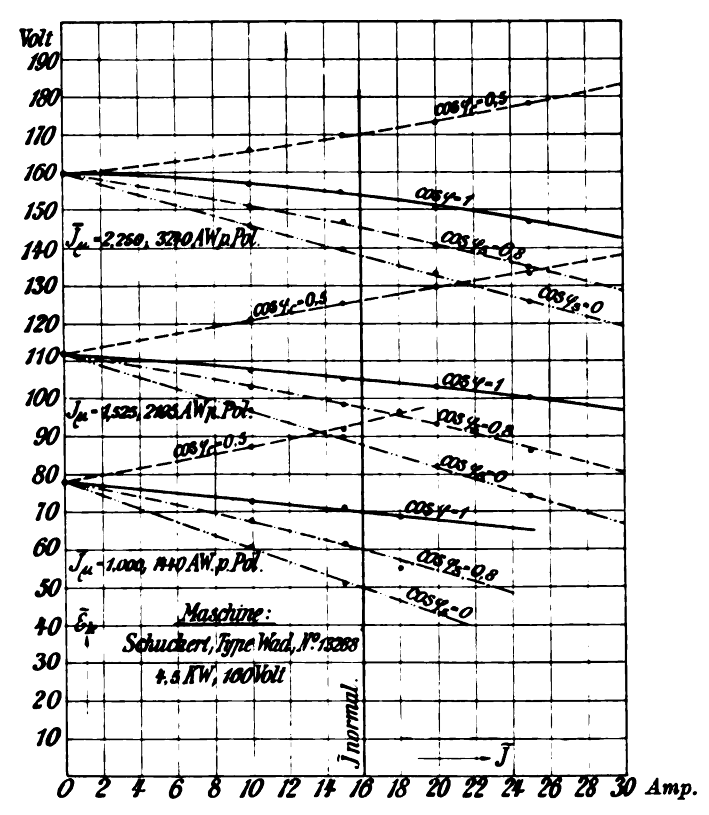


Fig. 165. Äußere Charakteristiken einer Wechselstrommaschine. Klemmenspannung $\tilde{E}_t$ abhängig von $\tilde{J}$ für $\cos\varphi =$ konst.; $J_\mu =$ konst.; $n =$ konst. abgeleitet aus den Kurven $\tilde{J} =$ konst.; $\cos\varphi$ veränderlich.

doch ist das Handhaben der letzteren während des Versuchs bei provisorischen Vorrichtungen zum Zwecke der Änderung von $\tilde{J}$ keine ganz einfache und ungefährliche Sache trotz löcherfreier Gummischuhe und -handschuhe.

82. Ableitung aus Kurven konstanter Stromstärke bei veränderlichem Leistungsfaktor.

Dieses unmittelbare Verfahren zur Aufstellung der Belastungscharakteristiken liefert für verschiedene Werte von $(\cos\varphi)$, die nach der in **78** angegebenen Weise erhalten werden können, für jeden konstanten Wert von $(\cos\varphi)$ entsprechend der Theorie (vgl. hierzu Hdb. IV. Aufl. 2 in **124**) eine $\tilde{E}_t, \tilde{J}$-Kurve, die den Teil eines Ellipsenquadranten darstellt. Fig. 165 gibt

die Kurven der äußeren Charakteristiken bei derselben Maschine (Schuckert, Type Wad Nr. 13288, 4·5 Kw, 160 Volt) für verschiedene Ausgangswerte $\bar{E}_0 = 160$ Volt, 110 Volt und 78 Volt, bzw. bei verschiedenen konstant gehaltenen Erregungen $\bar{J}_u = 2{\cdot}250$ Amp., 1·525 Amp. und 1·000 Amp. für mehrere Werte von $\cos\varphi$ wieder. Die unmittelbare Gewinnung der Kurven in Fig. 165 wird aber, wie schon in **81** angedeutet, nur dann gut durchführbar sein, wenn man als Belastung einen passenden Synchronmotor verwenden kann. Ist das, wie wohl praktisch häufig und auch hier, nicht der Fall, so wird man besser tun, die Kurven der Fig. 165 aus einer anderen Kurvenschar abzuleiten, welche die unmittelbar aufgenommenen Werte von ε abhängig von $\cos\varphi$, d. h. bei verschiedenen Werten des Leistungsfaktors, aber für

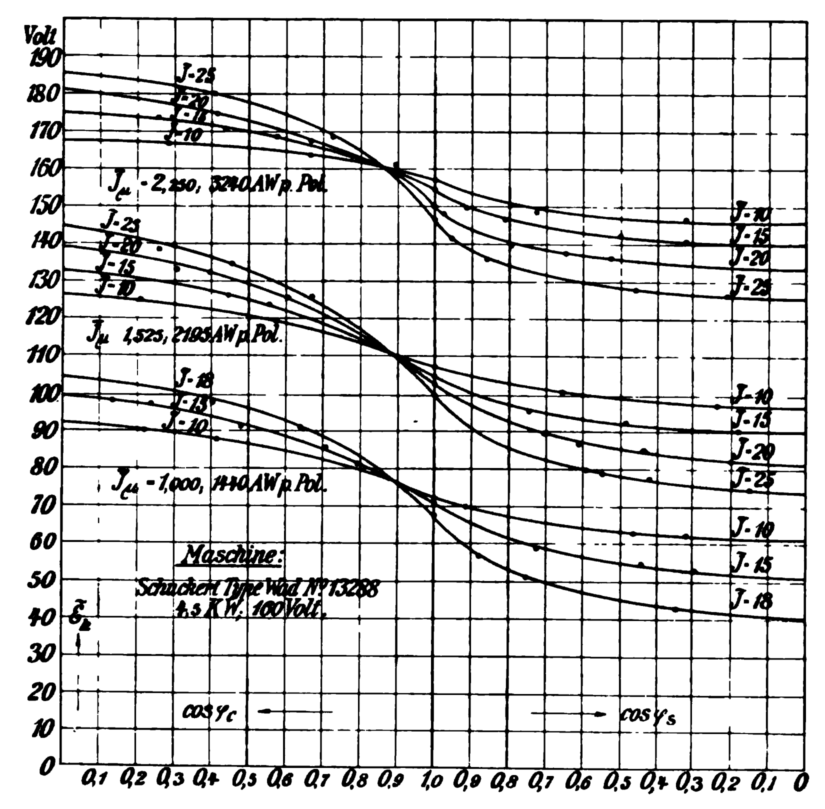


Fig. 166. Klemmenspannungskurven einer Wechselstrommaschine. Klemmenspannung $\bar{E}_k$ abhängig von $\cos\varphi$ bei $\bar{J} =$ konst.; $\bar{J}_u =$ konst.; $n =$ konst.

$\bar{J} =$ konstant neben $\bar{J}_u$ und $n =$ konstant zur Darstellung bringt,[1]) da die Einregulierung auf $\bar{J} =$ konstant viel leichter durchführbar ist als für $\cos\varphi$ = konstant.

Die Spannungsabfallkurven der Fig. 166, abhängig von $\cos\varphi$ aufgetragen für mehrere Belastungsstromstärken $\bar{J}$ und Erregungen $\bar{J}_u$ bei $n = 1500$ (konstant), gestatten die Entnahme der Werte für $\cos\varphi =$ konstant aus den Schnittpunkten jener Kurven mit den Vertikalen. So wurden die Kurven

1) Die Aufnahme der Kurven von Fig. 166 ebenso wie der Fig. 168 ist am Elektrotechnischen Institut der Technischen Hochschule München von dem Herrn Assistenten Kelber unter Beihilfe von Herrn Vetter erfolgt.

der Fig. 165 für $\cos\varphi = 1$, für $\cos\varphi_s = 0{\cdot}8$ und $\cos\varphi_c = 0{\cdot}5$ durch Interpolation, diejenige für $\cos\varphi_s = 0$ durch Extrapolation aus den Kurven der Fig. 166 gewonnen, die aber auch die äußeren Charakteristiken für alle übrigen Werte von $\cos\varphi$ zwischen $\cos\varphi_c = 0$ und $\cos\varphi_s = 0$ enthalten.

Die Änderung der Klemmenspannung $\tilde{E}_k$ zwischen Leerlauf ($\tilde{J} = 0$) und Vollbelastung $\left(\tilde{J} = \frac{V A_{\text{normal}}}{\tilde{E}_k}\right.$ bei Einphasenmaschinen; $\tilde{J} = \frac{V A_{\text{normal}}}{\sqrt{3}\,\tilde{E}_k}$ bei Drehstrommaschinen$\left.\right)$ erhält man sonach aus Fig. 165 durch die Schnitte der Kurven mit der Vertikalen $\tilde{J}_{\text{norm.}}$, d. i. in Fig. 165 etwa $\tilde{J} = 16$ Amp.

Zu bemerken bleibt jedoch zur Vermeidung von Irrtümern, daß nach

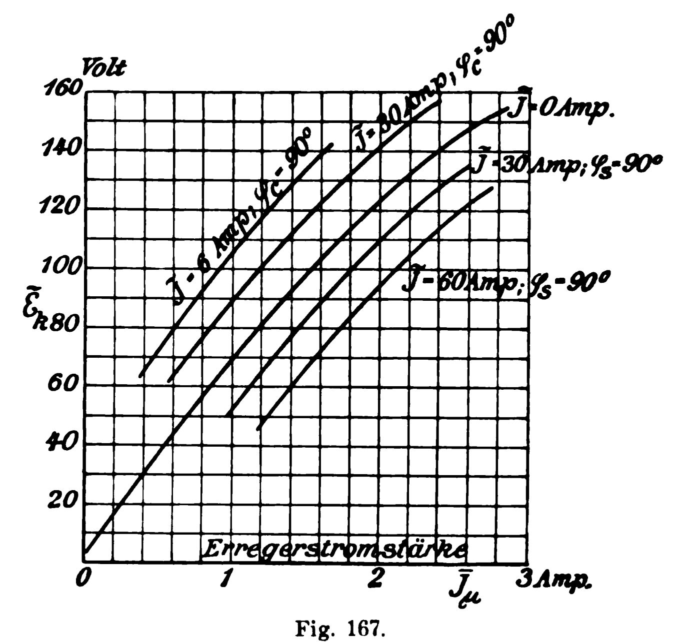


Fig. 167.

den Normalien des Verbandes (vgl. 76 § 45) bei $\cos\varphi = 1$ und $\cos\varphi_s < 1$ nicht der Spannungs**abfall** $\varepsilon = \frac{\tilde{E}_0 - \tilde{E}_k}{\tilde{E}_0} \cdot 100$, z. B. $\frac{6{\cdot}4}{160} \cdot 100 = 4\,\%$ in Fig. 165 für $\cos\varphi = 1$, denjenigen Wert in Prozenten gibt, welcher die Grundlage für garantiemäßige Festsetzungen liefert, sondern die Spannungs**erhöhung** $\Delta = \frac{\tilde{E}_0 - \tilde{E}_k}{\tilde{E}_k} \cdot 100$, welche nach Ausschaltung des Belastungsstromes $\tilde{J}$ bei gleichbleibendem $\bar{J}_\mu$ und n sich ergibt (vgl. Tabelle III in 89).

Wegen der Schwierigkeiten, welche der Durchführung dieses unmittelbaren Verfahrens vielfach im Wege stehen, sobald es sich um Wechselstromerzeuger größerer Leistung handelt, wie bei Zentralstationsmaschinen, begnügt man sich vielfach mit der Bestimmung des Spannungsabfalls mit Hilfe des folgenden mittelbaren Verfahrens (84), das meist als Kurzschlußverfahren bezeichnet, bei allen Untersuchungen von Wechselstromapparaten eine wichtige Rolle spielt und deshalb in ähnlicher Form im folgenden regelmäßig wiederkehrt. Allerdings ist die Verwertung der beobachteten Kurzschlußspannungen in Richtung der Vorausbestimmung des Spannungsabfalles ε oder

seiner 3 Komponenten, nämlich ε_R, ε_L und ε_G mit weiteren daraus abgeleiteten Werten in ihrer Zuverlässigkeit noch durch das gegenseitige Verhältnis der 3 Komponenten bedingt, da eine scharfe Trennung von ε_L und ε_G Schwierigkeiten machen kann. Bei der Ableitung der Belastungskurven aus der Kurzschlußkurve wird wegen der verhältnismäßigen Kleinheit von ε_R gegenüber ε_L und ε_G jene vielfach unberücksichtigt gelassen, wie dies auch in Fig. 168 geschehen ist.

4. Belastungscharakteristiken einer Wechselstrommaschine.

88. Belastungscharakteristiken.

Wird unter Benutzung der in Fig. 164 angegebenen Meßschaltung (gemäß der Tabelle I in 78 unter Nr. 4) die Belastungsstromstärke konstant ge-

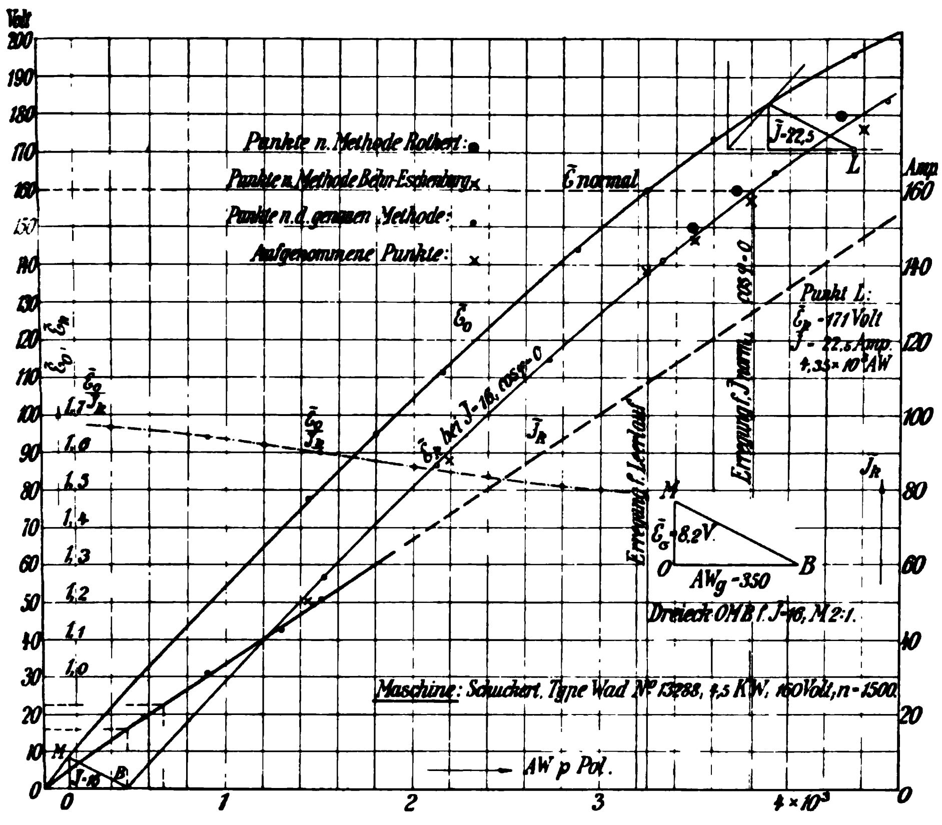
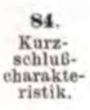


Fig. 168. Leerlauf- und Kurzschlußkurve einer Wechselstrommaschine. Experimenmentelle Bestimmung von $A\,W_g$ und $\tilde{E}_\sigma$. Vorausbestimmung des Spannungsabfalls **ohne** Berücksichtigung der Ohmschen Spannungsverluste.

halten, z. B. $\tilde{J} = 16$ Amp., aber **nicht** wie bei der Ermittelung der Werte von Fig. 166 auch $\tilde{J}_u$ konstant gehalten, vielmehr $\tilde{J}_u$ verändert unter gleichzeitiger Beobachtung des Wertes von $\tilde{E}_k$, so erhält man bei Konstanz von $\cos\varphi$ Kurven für $\tilde{E}_k$, die parallel zur Leerlaufcharakteristik $\tilde{E}_o$ verlaufen, etwa wie Fig. 167 andeutet. Diese Kurven werden vielfach als Belastungscharakteristiken bezeichnet, aber meist nicht unmittelbar aufgenommen, weil die Einhaltung der Bedingung $\tilde{J} =$ konstant und $\cos\varphi =$ konstant experimentell Schwierigkeiten macht, wenn man sich nicht auf bestimmte Grenzfälle beschränkt, wie sie etwa $\cos\varphi_s = 0$ und $\cos\varphi_c = 0$ darbieten und in

Fig. 167 durch die Kurven 3 und 4 bzw. 1 und 2 für verschiedene Belastungsstromstärken $\bar{J}$ nach **Arnold** dargestellt sind. Gewöhnlich leitet man diese Kurven aber aus der Leerlaufcharakteristik und der Kurzschlußkurve ab, wie dies Fig. 168 erkennen läßt. Zu diesem Zweck benötigt man außer der Aufnahme der Leerlaufcharakteristik $\bar{E}_0$, welche wie in **80** angegeben, erhalten wird, noch die experimentelle Ermittelung der Kurzschlußkurve bei derselben Tourenzahl n bzw. Periodenzahl u, bei welcher $\bar{E}_0$ aufgenommen wurde.

5. Kurzschlußcharakteristik einer Wechselstrommaschine.


84. Kurzschluß-charakteristik.

Zur Aufnahme der Kurzschlußkurve wird die Meßanordnung der Fig. 164 dahin vereinfacht, daß der Wechselstromkreis nur aus einem Amperemeter

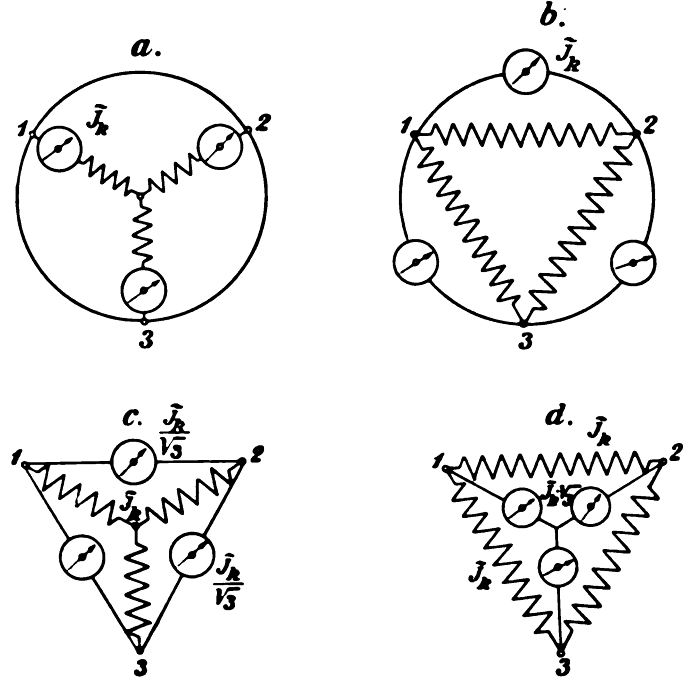


Fig. 169.

($\bar{J}$) besteht, durch welches die beiden Klemmen 1 und 2 kurzgeschlossen werden, wodurch $\bar{E}_k$ praktisch konstant gleich Null gemacht wird (vgl. Schema in **109** Fig. 219). Handelt es sich nicht um eine Einphasenmaschine, sondern um einen Drehstromerzeuger, so wird zur Erzielung symmetrischer Ankerreaktionen eine der vier in Fig. 169 skizzierten Schaltungen gewählt unter Anwendung dreier gleicher Amperemeter, wobei jedes Instrument bei a und b den Ankerwickelungsstrom $\bar{J}$ unmittelbar anzeigt, während die Angabe des Amperemeters $\frac{\bar{J}}{\sqrt{3}}$ bei c und $\sqrt{3}\,\bar{J}$ bei d beträgt. Trägt man die beobachteten Kurzschlußstromstärken $\bar{J}_k$ als Ordinaten zu den zugehörigen veränderlichen Werten des Erregerstromes $\bar{J}_a$ bzw. den Erregerwindungen pro Pol ($\bar{J}_a \cdot w \cdot \frac{1}{2p} = \bar{J}_a \cdot w_1$) als Abszissen auf, so erhält man, wie in

Fig. 168, eine Kurzschlußkurve, die von einer Graden nur sehr wenig abweicht, zumal innerhalb der zulässigen Belastungen, und bei einigen Maschinen für höhere Werte von $\tilde{J}_k$ ihre schwach konvexe Seite der Abszissenachse zukehrt.

Die Auswertung einer so erhaltenen $\tilde{J}_k, \overline{J}_\mu$-Kurve (für $w_1 = 1440$; vgl. hierzu auch Fig. 165 u. 166) in Verbindung mit der zugehörigen $\tilde{E}_0, \overline{J}_\mu$-Kurve zur Gewinnung der unter 4 besprochenen Belastungskurven zeigt Fig. 167, welche die Konstruktion der Klemmenspannungskurve $\tilde{E}_k, \overline{J}_\mu$ für $\tilde{J} = 16$ Amp. bei $\cos \varphi_s = 0$ aus der $\tilde{E}_0, \overline{J}_\mu$-Kurve durch Parallelverschiebung des Spannungsabfalldreiecks gibt, das aus $\varepsilon_L = 8{\cdot}2$ Volt und ε_G bzw. $AW_g = 350\ AW$ pro Pol gebildet wird. (Über die Theorie siehe weitere Literaturangaben in **81.**) Zum Vergleich sind in Fig. 168 noch die Punkte eingetragen, welche die einseitigen Spannungsabfalltheorien liefern, nämlich die Ankerreaktionstheorie nach Rothert und die Selbstinduktionstheorie nach Behn-Eschenburg.

Da in den Parallelschaltungsanlagen vielfach auf konstante Klemmenspannung reguliert werden muß, so ist praktisch auch noch eine Art Umkehrung der vorstehenden Beziehungen von Interesse, wie sie die Regulierungskurve darstellt.

6. Regulierungskurve oder $\overline{J}_\mu, \tilde{J}$-Kurve.

85. Regulierungskurven.

Die Meßschaltung der Fig. 164 in **78** gestattet auch, die erforderliche Veränderung von $\overline{J}_\mu$ festzustellen, wenn bei Änderung des Belastungsstromes $\tilde{J}$ alle übrigen Größen, also neben n und $\cos \varphi$ namentlich auch die Klemmenspannung $\tilde{E}_k$, unverändert bleiben sollen. Werden die Werte von $\overline{J}_\mu$ für passende Stufen von $\tilde{J}$ und für mehrere Werte des Leistungsfaktors, etwa $\cos \varphi = 1$, ferner $\cos \varphi_s = 0$ und $\cos \varphi_c = 0$ beobachtet und abhängig von $\tilde{J}$ eingetragen, so erhält man die Grenzkurven, wie sie Fig. 170 für eine der vorher erwähnten Maschine ähnliche Einphasenmaschine nach Arnold (vgl. Wechselstromtechnik Bd. IV Fig. 433) angibt. Der Ausgangspunkt der Regulierungskurve an der Ordinatenachse hängt hierbei von der Klemmenspannungsgröße $\tilde{E}_k$, ihre Neigung gegen die Horizontale vom Leistungsfaktor $\cos \varphi$ ab. So gibt Kurve a in Fig. 170 die $\overline{J}_\mu, \tilde{J}$-Kurve für $\tilde{E}_k = 110$ Volt und $\cos \varphi = 1$, während b diese für $\tilde{E}_k = 120$ Volt und $\cos \varphi_s = 0$, hingegen c diejenige für $\tilde{E}_k = 120$ Volt und $\cos \varphi_c = 0$ darstellt. Der gegensätzliche Charakter der Ankerreaktion von $\tilde{J}$ auf die Bildung des resultierenden Feldes je nach dem induktiven oder kapazitiven Charakter des Leistungsfaktors kommt bei b und c deutlich zum Ausdruck.

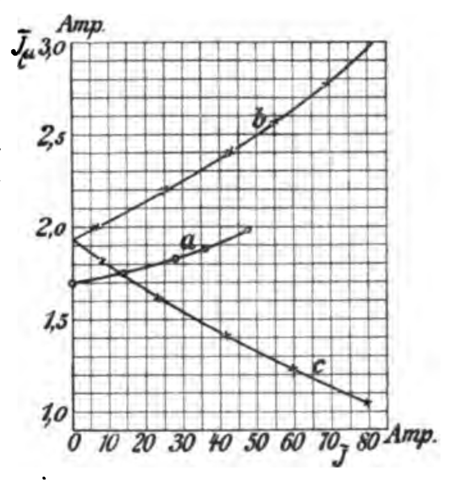


Fig. 170.

b) Wirkungsgradbestimmungen.

86. Ermittelungsarten. Unmittelbare Methoden.

Aus dem Vorangegangenen läßt sich erkennen, daß für die Beurteilung der Spannungsverhältnisse einer Wechselstrommaschine die Aufnahme der Leerlaufcharakteristik und der Kurzschlußkurve bei normaler Tourenzahl die praktisch wichtigsten Grundlagen liefert. In betriebstechnischer Hinsicht bedarf aber die Beurteilung der Maschine nach der wirtschaftlichen Seite noch der Wirkungsgradkurve als Ergänzung.

Bezeichnet man bei einem Wechselstromerzeuger die an den Maschinenklemmen abgegebene Nutzleistung mit W, so daß in der Beziehung

$$W = m \cdot \tilde{E} \cdot \tilde{J} \cdot \cos\varphi \text{ Watt}$$

$\tilde{E} \cdot \tilde{J} \cdot \cos\varphi$ die Phasenleistung und m die Zahl der symmetrisch belastet gedachten Phasen, so kann man hier, wie überhaupt bei jedem Umsetzungsapparat, auf Grund des Energieprinzips dem Wirkungsgrad η die Doppelfassung geben:

$$\eta = \frac{\text{abgegebene Nutzleistung}}{\text{zugeführte Leistung}} = \frac{W}{W + W_v},$$

wenn W_v die für sämtliche Verluste in der Maschine aufgewendete Leistung in Watt ausdrückt.

Für die Messung ergeben sich hieraus wiederum die beiden Hauptgruppen der Wirkungsgradbestimmung, nämlich die unmittelbare durch Messung der beiden Leistungen im Zähler und Nenner und die mittelbare durch Bestimmung des Betrages von W_v für sich. Zur Erlangung der Wirkungsgrad**kurve** muß in beiden Fällen die Messung für eine ausreichende Zahl von verschiedenen Belastungen erfolgen, doch wird man vielfach in $(m \cdot \tilde{E} \cdot \cos\varphi)$ jeden Faktor konstant lassen, sowie $\cos\varphi$ meist $= 1$ wählen, so daß alsdann W direkt proportional mit $\tilde{J}$ zunimmt und die Wirkungsgradkurve oder η, W-Kurve dementsprechend gleichzeitig abhängig von dem Belastungsstrom $\tilde{J}$ als η, $\tilde{J}$-Kurve aufgetragen werden kann.

Auf die erste Gruppe der Wirkungsgradbestimmungen mit unmittelbarer Messung beider Leistungen braucht hier nicht näher eingegangen zu werden, da diese Messungen bereits behandelt wurden, nämlich die Messung der vom Erzeuger abgegebenen Wechselstromleistung in **62** ff. und die Bestimmung der einer Dynamo zugeführten mechanischen Leistung in Hdb. II, 1, da deren Verwendung zur Erzeugung von Gleich- oder Wechselstromenergie keinen Unterschied ergibt.

Zu bemerken wäre hier nur nochmals, daß praktisch diese Art der Wirkungsgradbestimmung nur seltener Anwendung finden wird, etwa bei kleineren Maschinen mit niederen Wirkungsgraden, weil einmal die zuverlässigen Messungen großer mechanischer Leistungen schwierig und vielfach nur mit einem zu geringen Grad prozentualer Zuverlässigkeit durchführbar sind und ein zweites Mal, weil bei Werten von η über 90 % die Bestimmung des wirtschaftlich wichtigen Unterschiedes von 1 prozentual immer unzuverlässiger wird durch Messung der Gesamtgrößen, da die Nutzleistung W hierbei als Ballastgröße wirkt und diese Art der Bestimmung meßtechnisch aus den früher ausgeführten Gründen (II, 1 in **7**) immer schlechter wird.

Auch bei kleineren Maschinen wird man vielfach, um die schwierigen und doch nicht besonders zuverlässigen Messungen der zugeführten mechanischen Leistungen durch Übertragungsdynamometer (vgl. II, 1 in **214**) zu

vermeiden, gern eine Umkehrung der Meßanordnung derart vornehmen, daß man den Wechselstromerzeuger als Synchronmotor laufen läßt, die zugeführte Leistung elektrisch mittels der in **62 ff.** angegebenen Schaltungen mißt und die nutzbar abgegebene mechanische Leistung durch Bremsung bestimmt mit den in Hdb. II, 1 Art. **210** angeführten Anordnungen, da hierdurch die Bestimmung der mechanischen Leistung besser erfolgen kann.

Im allgemeinen wird der Elektrotechniker aber beim Messen die Bestimmung mechanischer Leistungen überhaupt möglichst vermeiden, und hierzu bei größeren Maschinen von vornherein durch die Umstände vielfach gezwungen sein. Er wird, wo irgend angängig, die Überführung der Meßgrößen auf das elektrische Gebiet vornehmen.

Demgemäß kommen auch für die Wirkungsgradbestimmungen bei Wechselstrommaschinen, soweit die Benutzung von Eichdynamos (**92**) nicht möglich

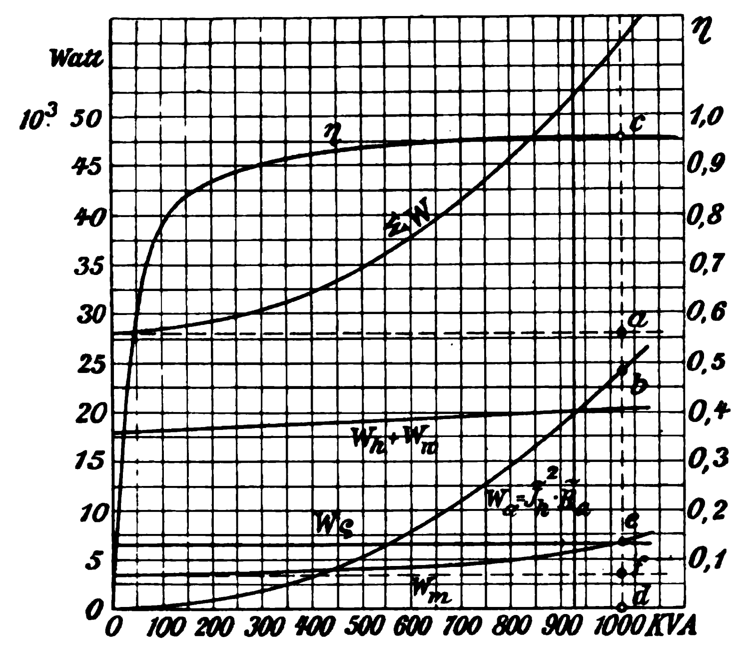


Fig. 171.

ist, praktisch fast allein die mittelbaren Methoden mit Messung der Verlustgrößen W_v in Frage.

87. Aus den Verlustgrößen. Zurückarbeitungsmethode oder Gegenschaltung.

Die Verfahren zur Messung von W_v kann man zunächst nach der Art des Vorgehens einteilen in sogenannte Zurückarbeitungsmethoden und in Methoden mit gesonderter Ermittelung der einzelnen Verlustglieder von W_v. Bei Wechselstrommaschinen wird W_v sich, ähnlich wie Hdb. II, 1 in **216** bei den Gleichstrommaschinen angegeben, zusammensetzen, nur unter Fortfall der Kollektorverluste. Bezeichnet man alle mechanischen Reibungsverluste mit W_ϱ, die Eisenverluste wegen ihrer Zweiteilung in Hysterese- und Wirbelstromverluste mit $W_h + W_w$, und die Kupferverluste in der Ankerwickelung mit W_a, in der Magnetwickelung mit W_m, so kann man $W_v = \Sigma W$ (Fig. 171) auflösen in

$$W_v = W_\varrho + W_h + W_w + W_a + W_m.$$

Die größte prozentuale Zuverlässigkeit besitzt wohl meistens die Ermittelung der Einzelverluste der rechten Seite und zwar einzeln oder in

Gruppen, wie weiter unten (**88**) ausgeführt mit Ableitung der η, W-Kurve aus der so erhaltenen W_v-Kurve (vgl. Fig. 171, nach E. Arnold, Wechselstromtechnik Bd. IV, Fig. 115). Vor Behandlung dieses wichtigsten Verfahrens, welches auf alle Maschinen, ja alle Umsetzungsapparate in ähnlicher Weise anwendbar ist (vgl. **101** und **107**), aber die Verluste nicht unter normalen Betriebsverhältnissen zur Messung bringt, sei noch kurz die Zurückarbeitungsmethode besprochen, welche eine Messung unter angenähert normalen Belastungsverhältnissen gestattet und insofern eine Art Übergang von den unmittelbaren zu den mittelbaren Verfahren darstellt. Abgesehen von der vielfach geringeren Zuverlässigkeit gegenüber der Ermittelung von η aus den Einzelverlusten, erfährt aber die Zurückarbeitungsmethode dadurch eine wesentliche Beschränkung der Anwendbarkeit, daß hierbei zwei gleiche Maschinen zusammen untersucht werden müssen, von denen die eine als Generator, die andere als Motor betrieben wird. Ihr Anwendungsgebiet wird also namentlich die schnelle Untersuchung des Wirkungsgrades einer größeren Zahl gleichgebauter Maschinen umfassen, wie dies in Fabriklaboratorien häufiger vorkommt, ferner noch die bequeme Durchführung von Dauerbelastungsproben an solchen Maschinen ohne Aufwendung größerer Antriebsleistungen, da der zur Messung des Gesamtwertes von W_v benutzte und vorher geeichte Hilfsmotor — meist ein Gleichstrommotor — nur die Verlustleistung $2\,(W_v - W_m)$ beider Maschinen einschließlich der Transmissionsverluste zu decken hat. Die Verschiedenheit der Tourenzahlen bei dem Hilfsmotor und den untersuchten Maschinen wird nämlich meist eine Übersetzung, etwa in Form einer Riemenübertragung notwendig machen.

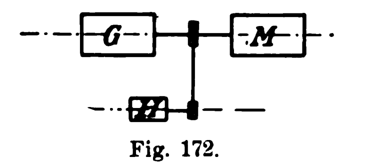


Fig. 172.

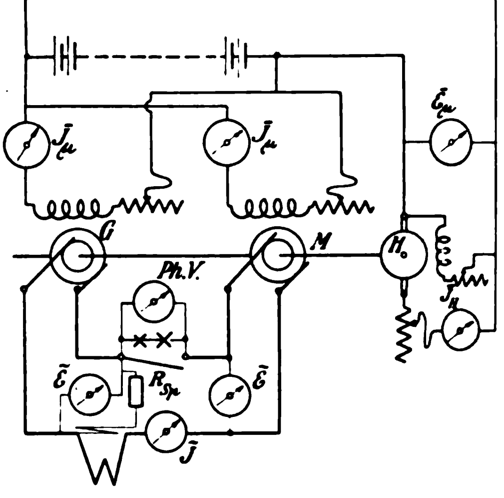


Fig. 173.

Werden der geeichte Hilfsmotor H und die beiden Versuchsmaschinen G und M, etwa wie in Fig. 172 andeutet, mechanisch miteinander gekuppelt, ferner die als Generator G arbeitende Maschine mit der als Motor M arbeitenden nach dem Schema der Fig. 173 elektrisch miteinander gekuppelt unter Einschaltung eines Voltmeters $\tilde{E}$, Stromzeigers $\tilde{J}$ und Wattmeters zur Messung der von G auf M übertragenen elektrischen Leistung $\tilde{W}$ nebst Bestimmung des Leistungsfaktors $\cos\varphi$ abhängig von der Erregung von G und M, so erhält man den mittleren Wirkungsgrad von η_G und η_M wie folgt:

Aus der vom geeichten Hilfsmotor H aufgenommenen Gleichstromleistung $\overline{E}_H \cdot \overline{J}_H$ in Watt folgt unter Entnahme von η_H aus der Eichkurve die von H abgegebene mechanische Leistung zu $\overline{W}_H = \overline{E}_H \cdot \overline{J}_H \cdot \eta_H$.

Wird der Wirkungsgrad der Riemenübertragung zu η_t eingesetzt — meist ist man hier auf etwas unsichere Schätzungen angewiesen — so ist die zur Deckung der Verluste 2 $(\tilde{W}_v - \overline{W}_m)$ von G und M zugeführte mechanische Leistung

$$\eta_t \cdot \overline{W}_H = 2\,(\tilde{W}_v - \overline{W}_m) \text{ oder } \tilde{W}_v = \frac{\eta_t \cdot \overline{W}_H}{2} + \overline{W}_m.$$

Hieraus folgt auf Grund der obigen Wirkungsgradfassung und bei der im wesentlichen als Parallelschaltung der Umsetzungsapparate G und M aufzufassenden Anordnung (vgl. hierzu in **106**)

$$\eta_G = \eta_M = \frac{\tilde{W}}{\tilde{W} + \frac{\eta_t \cdot \overline{W}_H}{2} + \overline{W}_m}.$$

Hierbei ist angenommen, daß die zu $\overline{E}_\mu \cdot \overline{J}_\mu$ gemessene Erregerleistung $\overline{W}_m$ bei beiden Maschinen nahezu gleich ist, was für den praktisch wichtigsten Fall, daß $\cos\varphi$ nahezu $= 1$ auch angenähert zutrifft, sonst müßte ein Mittelwert eingesetzt werden; es ist im übrigen nicht zu übersehen, daß die $\tilde{E}_o$-Werte bei G und M merklich voneinander abweichen, wodurch auch ihre $\tilde{W}_v$-Werte, namentlich die Eisenverluste beeinflußt werden. Um auch den hierdurch entstehenden Fehler möglichst auszuscheiden, müßte man $\tilde{E}_o$ bei G etwas höher, bei M etwas niederer als die normalen Werte wählen, also etwa die Meßspannung $\tilde{E}$ beim Versuch etwas höher als das betriebsmäßig vorhandene $\tilde{E}_k$ einstellen. Vor dem Einschalten bzw. Parallelschalten von G und M wird man sich bei dem zwangläufig vorhandenen Synchronismus von G und M nur noch von der Gleichheit von $\tilde{E}_o$ zu überzeugen haben, etwa durch die in Fig. 173 angedeuteten Voltmeter bzw. Phasenvoltmeter und -lampen.

Ist die verfügbare Erregerspannung $\overline{E}_o$ von der als normal anzusehenden Spannung $\overline{E}_\mu$ verschieden, so ist richtiger $\overline{J}_\mu \cdot \overline{E}_\mu$ für $\overline{W}_m$ einzusetzen, nicht aber $\overline{J}_\mu^2 \cdot R_m$, wenn R_m den Ohmschen Widerstand der Erregerwickelung bedeutet, da der Regulierwiderstand des Erregerkreises ein notwendiges und vom Konstrukteur zu berücksichtigendes Betriebsglied der Maschine darstellt (vgl. hierzu in **76** und **85**).

88. **Messung der Einzelverluste.**

Bei den Wirkungsgradbestimmungen durch Ermittelung der Einzelverluste von

$$W_v = W_\varrho + W_h + W_w + W_a + W_m$$

wird man (siehe hierzu auch II, 1 in **216 ff.**) die Messung der rechten Seite durch gruppenweises Zusammenfassen geeigneter Glieder zur Ausführung bringen. Zunächst wird man die Erregerleistung $\overline{W}_m = \overline{E}_\mu \cdot \overline{J}_\mu$ ausscheiden, deren Messung als Gleichstromleistung keine Schwierigkeit bietet und wie vorstehend (**87**) angeführt erfolgt. Allerdings ist der Hinweis nicht überflüssig, daß auch bei Erregung mit Gleichspannung aus einer Akkumulatorenbatterie die Rückwirkung des Ankerstromes $\tilde{J}$ der belasteten Wechselstrommaschine durch Wechselinduktion in der Erregerwickelung eine erhebliche Wechselspannung $\tilde{E}_\mu$ induziert, die sich jenem $\overline{E}_\mu$ überlagert und eine ausgesprochene Wellenspannung $\overset{w}{E}_\mu = \sqrt{\overline{E}_\mu^2 + \tilde{E}_\mu^2}$ zur Folge hat. Trotzdem wird aber die dadurch sich ergebende Wellenstromleistung $\overset{w}{W}_\mu$ im Erregerkreise praktisch meist nur wenig von der durch Gleichstrominstrumente ermittelten Gleichstromleistung $\overline{W}_\mu = \overline{E}_\mu \cdot \overline{J}_\mu$ abweichen, weil die aus $\overset{w}{E}_\mu$ bzw. $\tilde{E}_\mu$ resul-

[illegible] Wechselkomponente $J_s = E_s : \sqrt{R_s^2 + \omega L_s^2}$ des Erregerstromes und [illegible] der Größe von L_s, d. i. des Selbstinduktionskoeffizienten der Erregerwicklung, gewöhnlich so klein ausfallen wird, daß man den Einfluß von J_s auf J_s und auf W_s vernachlässigen kann (siehe hierzu auch I. 2 in 152).

Die [illegible] verbleibenden Glieder der rechten Seite in der obigen Gleichung für W wird man zusammenfassen können einerseits als Leerlaufleistung $W_l = W_\varrho + W_h + W_w$ bei normaler Tourenzahl und Erregung oder [illegible] magnetischer Beanspruchung, andererseits als Kurzschlußleistung $W_c = W_k - W_\varrho$ bei normaler Strombelastung im Ankerdraht, aber sehr kleiner magnetischer Beanspruchung bzw. Spannung E_s bei Kurzschluß, wobei nach ARNOLD Bd. IV Seite 63[illegible] die magnetischen Verluste etwa den zusätzlichen Verlusten infolge Feldkurvenverzerrung bei normal belasteter Maschine gleich zu setzen wären, also beide nicht gesondert berücksichtigt zu werden brauchen (vgl. auch 76 unter § 44). Schließlich kann man die Reibungsverluste W_ϱ für sich ermitteln, wenn man die unerregte Wechsel-

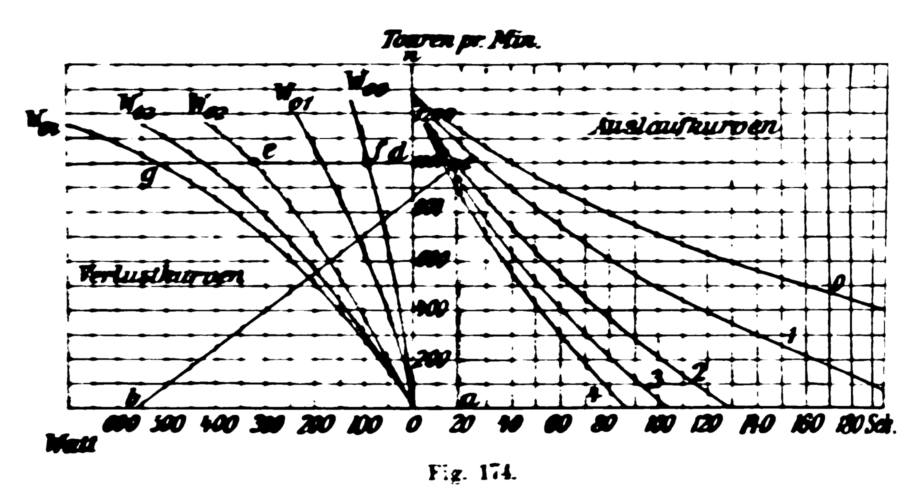


Fig. 174.

strommaschine bei normaler Tourenzahl aber offenem Ankerstromkreis laufen läßt und die hierzu erforderliche mechanische Leistung mißt.

Für die Messung der erforderlichen mechanischen Antriebsleistungen zur Kompensierung von W_l bzw. W_c bzw. W_ϱ kommen außer den oben erwähnten weniger zuverlässigen Methoden (siehe in 86, sowie Hdb. II. 1 in 214) im wesentlichen 2 Verfahren in Frage: Entweder verwendet man einen geeichten Gleichstrommotor wie in 87 den Hilfsmotor H, oder man benutzt die lebendige Kraft $\frac{M \cdot v^2}{2}$ des rotierenden Teiles der Wechselstrommaschine und bestimmt deren Aufzehrung durch Beobachtung des Auslaufes. Beide Verfahren wurden bereits eingehender bei den Gleichstrommaschinen behandelt (siehe II. 1 in 220), weshalb hier nur noch einige Ergänzungen angefügt seien, die namentlich für Wechselstrommaschinen gelten.

Die Ermittelung von $W = - C \cdot n \cdot \frac{dn}{dt}$ setzt allerdings die Bestimmung der nur experimentell gewinnbaren Maschinenkonstanten C voraus. Um diesen C zu bestimmen, müßte man eine Gruppe der Verlustkurven, z. B. die Leerlaufverluste $W_l = W_\varrho + W_h + W_w$ abhängig von der Tourenzahl auf

anderem Wege ermitteln, entweder mit geeichtem Motor H wie oben, oder besser, indem man die Maschine als Synchronmotor bei Ankerstromminimum (siehe **91**) laufen läßt, die zugeführte Leistung $\tilde{W}_o + \tilde{W}_a$ elektrisch mittels Wattmeter mißt (**62 ff.**) und die Stromwärme $\tilde{J}_a^2 \cdot \tilde{R}_a$ bei Einphasen- und $m \tilde{J}_a^2 \cdot \tilde{R}_a$ bei Mehrphasenmaschinen bestimmt. Trägt man diese Verlustkurven nach Arnold (Wechselstromtechnik Bd. IV Seite 640) für verschiedene Erregerstromstärken etwa $\bar{J}_\mu = 0; = {}^1/_4; = {}^1/_2; = {}^3/_4; = {}^4/_4$ der normalen Erregerstromstärke als W_{00}, W_{01}, W_{02}, W_{03}, W_{04} in Fig. 174 links von der Tourenzahl- als Ordinatenachse auf, bestimmt ferner etwa mit Hilfe eines Tachometers und genauer Uhr zu denselben Erregerstromstärken die Auslaufzeiten bzw. Auslaufkurven, welche rechts von der Ordinatenachse aufgetragen werden, so liefert für die normale Tourenzahl (1000 in Fig. 174) die Subtangente $a\ b = n \cdot \frac{dn}{dt}$ und die Strecke $d\ e = W_\varrho + W_h + W_w$ — beide für ${}^1/_2 \bar{J}_\mu$ — die Konstante

$$C = \frac{d\ e}{a\ b} = W_{02} : \left(n \cdot \frac{dn}{dt}\right).$$

Um bei W_ϱ Fehler durch Änderung der Lagertemperatur zu vermeiden, läßt man Motor und Wechselstrommaschine zunächst bei normaler Tourenzahl ($n = 1000$ in Fig. 174) einlaufen und mißt alsdann W_{00}, W_{01}, W_{02}, W_{03} und W_{04}, erhöht hierauf möglichst rasch die Tourenzahl um etwa 25 % und beobachtet die Auslaufkurven, am besten in der Reihenfolge 4, 3, 2, 1, 0. Ist der Wert von C aus einem Kurvenpaar bestimmt, so kann man aus C und den Auslaufkurven bzw. $a\ b = n \cdot \frac{dn}{dt}$ auch die übrigen Verlustkurven ableiten, z. B. $W_{00} = W_\varrho$, und erhält weiterhin als Differenz

$$e\ f = e\ d - f\ d = W_{02} - W_{00}$$

für $n = 1000$ die reinen Eisenverluste $W_h + W_w$ für $\frac{1}{2}(\bar{J}_\mu)_{\text{norm.}}$, oder in der Strecke $g\ f = 430$ Watt die Eisenverluste $W_h + W_w$ für $(\bar{J}_\mu)_{\text{norm.}}$ Weiteres über die Trennung der Eisenverluste in W_h und W_w usf. siehe **175**.

Wird nach Kurzschluß der Ankerwickelung durch ein passendes Amperemeter und bei Erregung der Maschine mit einem solchen Wert von J_μ, daß der Kurzschlußstrom $\tilde{J}_k$ bei $n = 1000$ etwa den normalen Wert besitzt, die Auslaufkurve in entsprechender Weise beobachtet wie oben, so kann man aus ihr mit Hilfe der Beziehung $d\ e = C \cdot a\ b$ die Verlustkurve $W_\sigma = W_a + W_\varrho$ ableiten und erhält W_a als Differenz $W_\sigma - W_\varrho = W_\sigma - W_{00}$. Ist so $\tilde{W}_a$ ermittelt, so kann man hieraus den wirksamen Wechselstromwiderstand $\tilde{R}_a$ der Maschine in Ω_w ableiten zu

$$\tilde{R}_a = \tilde{W}_a : \tilde{J}_a^2$$

bei Einphasenmaschinen und

$$\tilde{R}_a = \tilde{W}_a : m \cdot \tilde{J}_a^2$$

bei Mehrphasenmaschinen.

Eine weitere Möglichkeit, den Wert von $\tilde{W}_a$ bzw. von $\tilde{R}_a$ auf elektrischem Wege zu messen, bietet die oben zur Bestimmung von W_o angeführte Synchronmotorschaltung. Wird die elektrische Schaltungsanordnung der Fig. 175, oder auch (für Einphasenmaschinen) die der Fig. 173 benutzt, letztere jedoch ohne mechanische Kuppelung von G und M, sowie mit der Möglichkeit, H von M abzukuppeln, nachdem die hier als Untersuchungsobjekt gedachte Wechselstrommaschine M mit G parallel geschaltet, also

elektrisch gekuppelt ist, so kann man wie folgt verfahren: Man reguliert zuerst den Erregerstrom J_u von M so ein, daß bei gewünschtem bzw. normalem $\tilde{E}_M$ die aufgenommene Stromstärke $\tilde{J}$ ein Minimum wird. Alsdann beträgt die vom Wattmeter nach erfolgter Korrektion (63) gemessene Leistung $\tilde{W}_1 = W_o + m \cdot \tilde{J}_o^2 \cdot \tilde{R}_a$. Wird hierauf — nötigenfalls (siehe hierzu Bedell & Ryan ETZ 1895, Heft 15) nach Einschaltung passender induktiver Widerstände L zwischen M und G bzw. Netz, wie Fig. 175 für eine Drehstrommaschine M andeutet — J_u von M bzw. von G so einreguliert, daß $\tilde{E}_M$ seinen normalen Wert wie vorher beibehält, aber $\tilde{J}$ — bei Drehstrom in allen 3 Zweigen übereinstimmend — durch Über- oder Untererregung von M so stark anwächst, daß es die normale Belastungsstromstärke erreicht, so mißt jetzt das Wattmeter die Leistung

$$\tilde{W}_2 = W_o + m\,\tilde{J}^2 \cdot \tilde{R}_a = W_o + W_a.$$

Die Differenz $\tilde{W}_2 - \tilde{W}_1$ liefert somit $W_a - m\,\tilde{J}_o^2 \cdot \tilde{R}_a$.

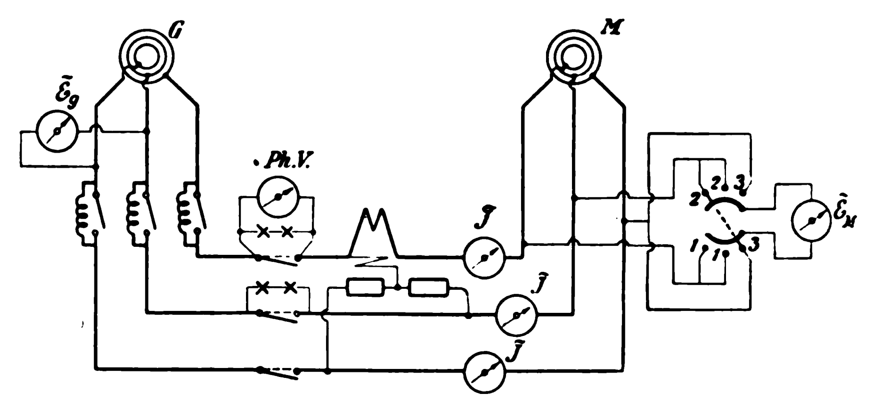


Fig. 175.

Hieraus folgt

$$\tilde{R}_a = \frac{\tilde{W}_2 - \tilde{W}_1}{m\,(\tilde{J}^2 - \tilde{J}_o^2)} \quad \text{oder angenähert} \quad \frac{\tilde{W}_2 - \tilde{W}_1}{m\,\tilde{J}^2} \quad \text{für } \tilde{J}_o \text{ klein gegenüber } \tilde{J}.$$

Hat man so die einzelnen Verlustglieder entweder rein elektrisch oder mit Hilfe der Auslaufkurven ermittelt, so erhält man den Wirkungsgrad oder die Wirkungsgradkurve nach der in 86 angegebenen Gleichung. Die graphische Auftragung der einzelnen Verlustkurven, sowie der Gesamtverluste W_v und des Wirkungsgrades $\eta = \dfrac{W}{W + W_v}$ abhängig von der Nutzleistung W läßt dann auch (wie in Fig. 171 angedeutet) erkennen, daß der maximale Wirkungsgrad bei einer Belastung eintritt, welche die mit $\tilde{J}^2$ proportional wachsenden Verluste gleich dem Leerlaufverlust W_o macht, d. h. in Fig. 171 die Strecken $d\,f + f\,e = d\,a$ macht.

89. Wirkungsgrad von Dampfdynamos.

Bei größeren Maschinen mit direkter Kuppelung ist die Nachprüfung des Wirkungsgrades der Dynamo für sich nach ihrer Aufstellung in der elektrischen Zentrale vielfach mit Schwierigkeiten verknüpft. Zwar kann man auch hier durch Aushängen der Pleuelstange bei Zylinderdampfmaschinen, oder dadurch, daß man bei Turbinenantrieb die Antriebsmaschine ohne Beaufschlagung laufen läßt, eine Leerlaufsmessung ermöglichen, doch erscheinen diese Maßnahmen bei Garantieversuchen teils zu umständlich.

teils ist bei Dampfdynamos die konstruktive Verknüpfung von Dynamo und Dampfmaschine eine so innige, daß eine scharfe Trennung schon wegen der gemeinsamen Lager nicht gut durchführbar ist. Aus allen diesen Gründen wird die Dampfdynamo vielfach als ein einheitliches Ganzes angesehen und der Wirkungsgrad bei den Garantiefestsetzungen häufig für das ganze Aggregat vereinbart, etwa in der Weise, daß für die Kilowattleistung am Schaltbrett ein bestimmter Dampfverbrauch in kg bei bestimmter Dampf-

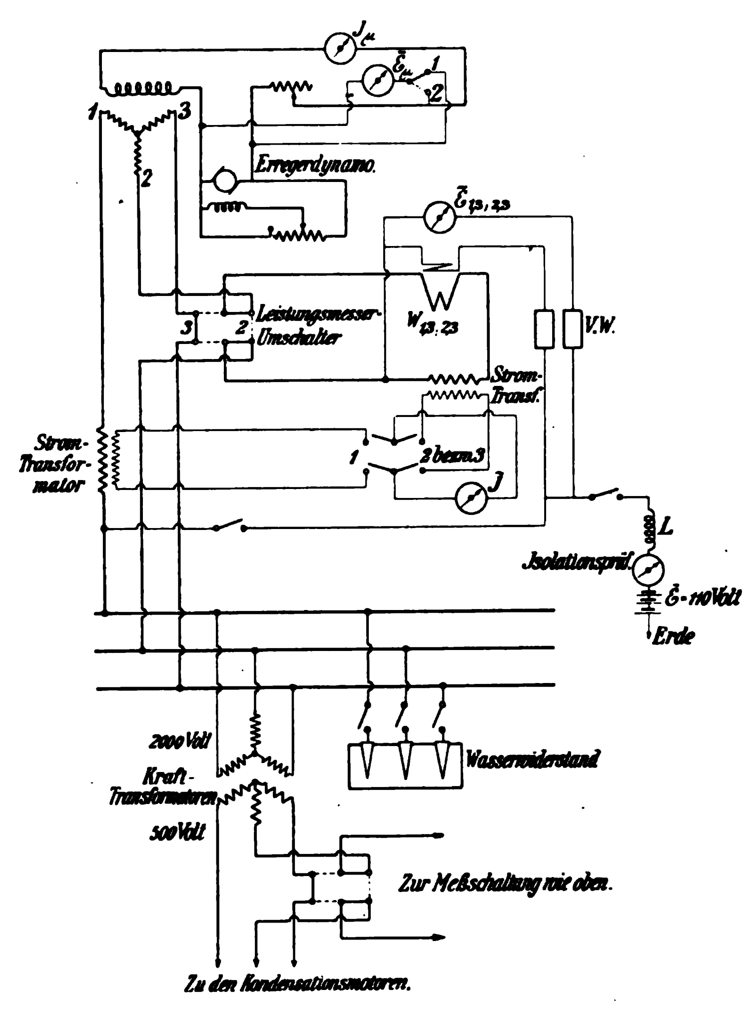


Fig. 176.

bzw. Kondensatorspannung nicht überschritten werden darf, wobei natürlich eine gewisse Differenzierung im Dampfverbrauch abhängig von dem Prozentsatz der Belastung des Aggregates vorgesehen werden muß. Die Garantieversuche zur Prüfung des Dampfverbrauchs auf das Kilowatt Schaltbrettleistung nach erfolgter Aufstellung des Aggregates in der Zentrale werden gleichzeitig wegen der hierzu erforderlichen Versuchsdauer eine Dauerprobe mit einschließen. Weiteres über Zentralstationsmaschinen siehe in Bd. VII.

Um bei einem derartigen Versuch eindeutige Werte erhalten zu können, sind neben sorgfältigen elektrischen Messungen der Schaltbrettleistung in

Tabelle II. Feststellungen am Turbo-Alternator.

		Datum des Versuchs 1904						
		18. X.	21. X.	19. X.	19. X.	19. X.	11. XII.	11. XII.
Belastung		Volllast	Volllast	ca. 3/4 Belastung	ca. 1/2 Belastung	ca. 1/4 Belastung	Leerlauf mit Erregung	Leerlauf mit Erregung
Art des Versuchs	Kondensation	mit	ohne	mit	mit	mit	mit	mit
	Höhe der Belastung KW	924,8	894,8	674,5	458,4	265,0	—	—
Dauer des Versuchs in Stunden		8	8 1/4	1	54 Min.	1 Min.	1,0	1,0
Admission vor dem Absperrventile	Atm. Dampfdruck	10,4	10,4	10,6	10,8	10,9	9,9	10,9
	Dampftemperatur °C	254,0	249,0	249,0	254,5	257,0	232,4	237,0
Vakuum	Barometerstand cm	76,3	—	77,1	77,1	77,1	74,8	74,8
	Abgelesen cm	65,9	—	69,8	68,4	70,7	68,9	69,7
	%	86,4	—	90,5	88,7	91,6	92,2	93,1
	reduziert auf 76,0 cm	65,6	—	68,8	67,4	69,6	70,1	70,7
	%	86,4	—	90,5	88,7	91,6	92,2	93,1
Lager	Öltemperatur im Sammelbehälter °C	56,5	57,0	58,7	59,1	59,5	52,4	58,4
	Druck im Windkessel der Ölpumpe Atmosph. Überdruck	1,6	1,7	1,6	1,6	1,6	1,7	1,8
Umdrehungen minutlich	mittels Handtachometer	1524,0	1513,0	1527,0	1527,0	1529,0	1474,7	1477,0
	„ Maschinentachometer	1531,0	1519,0	1532,0	1533,7	1534,0	1498,0	1506,0
Erregermaschine	Volt	106,9	108,4	117,2	94,9	99,9	—	103,3
	Ampere	96,0	94,2	86,3	87,0	78,5	—	78,7
	KW	10,3	10,2	10,1	8,2	7,8	—	8,1
Erregung	Volt	90,9	90,3	77,5	79,3	69,2	—	66,2
	Ampere	96,0	94,2	86,3	87,0	78,5	—	78,7
	KW	8,7	8,5	6,7	6,9	5,4	—	5,2
Generator	Volt	2003,4	2006,0	2002,7	1999,4	2004,5	—	—
	Ampere	297,9	288,5	205,4	161,9	80,7	—	—
	KW	924,8	894,8	674,5	458,4	265,0	—	—
	$\cos\varphi$	0,895	0,894	0,947	0,818	0,946	—	—

Kondensat-Temperatur		43,8	—	36,0	41,0	37,0	39,7	41,6
Dampfverbrauch	in kg stündlich							
	a) bestimmt aus dem Kondensat	7700	—	6175	4667	3098	761,5	1175,0
	b) bestimmt aus dem Kesselspeisewasser nach Abzug des Kondensats in der Leitung	7925	13733	—	—	—	—	—
	Verlorenes Wasser kg	225	—	—	—	—	—	—
	für 1 KW in kg							
	a) bestimmt aus dem Kondensat	8,3	—	9,2	10,2	11,7	—	—
	b) bestimmt aus dem Kesselspeisewasser nach Abzug des Kondensats in der Leitung	8,6	15,3	—	—	—	—	—
Dampfverbrauch umgerechnet auf 90 % Vakuum	in kg stündlich							
	a) bestimmt aus dem Kondensat[1]	7392	—	6239	4630	3153	—	—
	b) bestimmt aus dem Kesselspeisewasser nach Abzug des Kondensats in der Leitung	7608	—	—	—	—	—	—
	für 1 KW in kg							
	a) bestimmt aus dem Kondensat[1]	8,0	—	9,25	10,1	11,9	—	—
	b) bestimmt aus dem Kesselspeisewasser nach Abzug des Kondensats in der Leitung	8,2	—	—	—	—	—	—
Kraftbedarf der Kondensation in KW		49,5	—	46,6	44,7	44,1	43,5	—
" " " " % der Generatorleistung		5,3	—	6,9	9,7	16,6	—	—
Wirklich abgegebene KW nach Abzug des Verbrauchs für die Kondensationsmotoren		875,3	—	627,9	413,7	220,9	—	—
Dampfverbrauch für 1 KW (berechnet aus dem gewogenen Kondensat)		8,8	(15,3)	9,8	11,3	14,0	—	—

1) Die Umrechnung erfolgte nach Angaben der Firma Brown. Boveri & Cie. derart, daß der stündlich festgestellte Dampfverbrauch im Verhältnis des hierbei jeweilig gemessenen zum anzunehmenden Vakuum (hier 90 %) reduziert wurde.

Kilowatt, sowie des Leistungsfaktors ($\cos\varphi$), vor allen Dingen auch sehr genaue Messungen aller Betriebsbedingungen erforderlich, welche den Dampfverbrauch beeinflussen. Was hierbei alles in Frage kommt, möge an dem Beispiel von sorgfältig durchgeführten Messungen an einem sogenannten Turbo-Alternator, d. h. einem Drehstromerzeuger (der Siemens-Schuckert-Werke), der von einer Dampfturbine (von Brown, Bovery & Cie.) angetrieben wird, gezeigt werden (vgl. hierzu Zeitschrift „Glückauf", Jahrgang 1904, Nr. 49, bzw. Nachrichten der S. S. W. Dez. 1905, Heft 7).

Die vollständige Schaltungsanordnung für die Messung der elektrischen Größen läßt Fig. 176 erkennen. Der für sich bestehende Erregerkreis, beschickt von einer gleichfalls mit der Dampfturbine direkt gekuppelten Gleichstromdynamo mit Nebenschlußerregung, enthält ein Amperemeter mit Nebenschluß zur Messung von $\bar{J}_\mu$ und ein Gleichstromvoltmeter, das mittels Umschalter entweder (Kontakt 1) die Bürstenspannung der Erregerdynamo $\bar{E}_\mu$, oder (Kontakt 2) die Nettospannung $\bar{E}$ an den Enden der Erregerwickelung zu messen gestattet. Der Arbeitskreis des Drehstromerzeugers wird teils von Motoren gebildet, welche mit Hilfe von Transformatoren angeschlossen sind — über die Meßschaltungen bei den Motoren siehe in **99** — teils durch einen regulierbaren Wasserwiderstand, weshalb der Leistungsfaktor bei den Versuchen je nach der Mischung beider etwas variiert (vgl. unter $\cos\varphi$ in Tabelle II). Die Meßvorrichtungen werden, neben dem (gewöhnlich ausgeschalteten) Meßkreis zur Ermittelung der Isolation aller Leitungen gegen Erde mit Hilfe der Gleichspannung $\bar{E} = 110$ Volt und eines Drehspuleninstrumentes mit vorgeschalteter hoher Selbstinduktion L, von folgenden Wechselstrominstrumenten gebildet: Ein Amperemeter zur Messung des Arbeitsstromes $\tilde{J}$ in jeder der 3 Leitungen mit Hilfe von Stromtransformatoren (7) und Umschaltern; ein Voltmeter mit entsprechenden Vorschaltwiderständen $V.W.$ zur Messung der Drehstromspannung zwischen je zwei Hauptleitungen ($\tilde{E}_{1,3}$ und $\tilde{E}_{2,3}$ mit etwa 2000 Volt) je nach Stellung des Hauptstromumschalters für den Leistungsmesser; ein Wattmeter mit Hauptstromumschalter (siehe **72**) zur Messung der Drehstromleistung des Erzeugers nach der Zweiwattmetermethode.

Die hiermit beobachteten elektrischen Größen enthält die Tabelle II (auf Seite 182 und 183), welche außerdem noch alle übrigen Meßgrößen wiedergibt, die zur Feststellung der Endwerte erforderlich sind. Diese werden für normalen Betrieb (mit Kondensation) durch die Zahlen der beiden letzten Horizontalreihen der Tabelle II wiedergegeben und graphisch in der Fig. 177, welche nebenbei den erheblichen Einfluß des erzielten Vakuums erkennen läßt, in Übereinstimmung mit der großen Differenz im Dampfverbrauch bei Volllast mit Kondensation (8·8 kg) und ohne Kondensation (15·3 kg).

Neben der Messung dieser wirtschaftlich bedeutungsvollen Größen ist die Feststellung der betriebstechnisch wichtigen Rückwirkungen von Belastungsschwankungen auf die Hauptbetriebsgrößen des Aggregates erforderlich, da diese meist einen Punkt der Garantie bilden. Hierher gehören die Spannungsänderung der Dynamo für sich bei konstant gedachter Tourenzahl n (siehe in **82**) und die beträchtliche Schwankung von n in Größe und Dauer abhängig von der Güte und Schnelligkeit der Reguliervorrichtung. Die Messung dieser Schwankung kann entweder durch Ablesungen am Tachometer, oder durch Beobachtung des Spannungsverlaufes einer Gleichstromdynamo mit gesonderter konstanter Erregung (aus Akkumulatoren), am

besten aber wohl durch Aufzeichnungen eines Tachographen erfolgen, wie sie etwa Fig. 178 für das Aggregat aus Dampfturbine und Drehstromgenerator mit 1125 Kilovoltampere bzw. 900 Kilowatt bei $\cos\varphi = 0{\cdot}8$, $u = 50$, $n = 1500$ für verschieden große Belastungsänderungen wiedergibt. Die Ergänzung

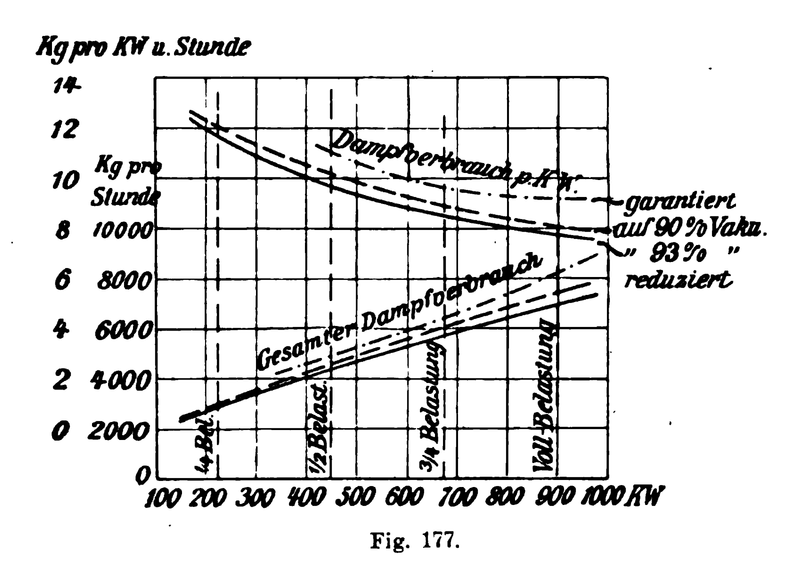


Fig. 177.

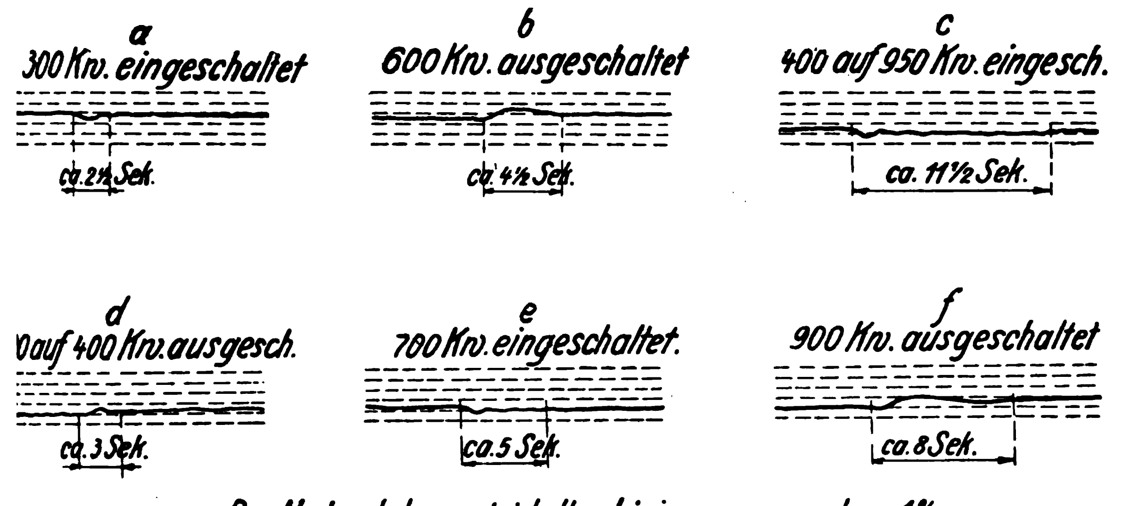


Fig. 178.

hierzu liefert die Tabelle III, welche außerdem die beobachteten Spannungsschwankungen in absolutem und prozentualem Verhältnis angibt, wobei zu berücksichtigen ist, daß die letzteren Werte hier deshalb etwas höher werden, weil die direkt gekuppelte Erregermaschine gleichfalls von n beeinflußt wird.

Tabelle III. Regulierversuche.

Fig. 178 Tachogramm	Art der Be- bzw. Entlastung KW	Belastungsschwankung in % der Volllast	Tourenzahlschwankung in %		Spannungsschwankung		Spannungsschwankung in % der Anfangswerte	Spannungserhöhung $\Delta = \frac{\tilde{E}_o - \tilde{E}_k}{\tilde{E}_k} \cdot 100$ für n = konstant
			ermittelt	garantiert	Anfangswert	Endwert		
a	0 auf 300	33	0·6	—	2020	2000	1·0	—
b	600 „ 0	67	1·2	—	2009	2103	4·6	4·6 — 1·2 = 3·4
c	400 „ 950	50	1·0	1·5	2131	2027	5·0	—
d	900 „ 400	45	1·0	—	2034	2120	4·2	—
e	0 „ 700	78	1·0	—	2120	2014	5·0	—
f	900 „ 0	100	1·5	5·0	2020	2300	14·0	14·0 — 1·5 = 12·5

90. Daueruntersuchungen und Temperaturerhöhung.

Für die Dauerleistung einer Maschine bildet neben den bisher betrachteten Spannungsabfall- und Wirkungsgradverhältnissen die Temperaturerhöhung der Maschine die wichtigste Größe. Über die Messungen dieser Größe kommen die bereits Hdb. II, 1 in **225** angeführten, Gesichtspunkte sowie die Bestimmungen der „Normalien" (**76**) in Betracht. Während die Messung der Eisentemperatur durch gut geschützte Thermometer erfolgen muß, ist bei den Kupferdrahtwickelungen die bequemere und zuverlässigere Bestimmung der elektrischen Messung durch Feststellung der Widerstandsänderung anzuwenden (vgl. § 15 in **76**).

Bei den Feldspulen, welche meist durch Gleichstrom erregt werden, ist diese Bestimmung, welche stets aus Gleichstrommessungen zu $\overline{R} = \overline{E} : \overline{J}$ erfolgt (§ 16 in **76**), ohne weiteres ausführbar.

Etwas schwieriger liegen die Verhältnisse bei der Ankerwickelung, zumal bei großen Leistungen, da hier der für stationäre Temperaturverhältnisse erforderliche Betrieb unter normaler Volllast mehrere Stunden dauern müßte. Die hierzu erforderlichen Leistungen werden wohl bei Garantieversuchen (vgl. **89**), aber meist nicht im Laboratorium zur Verfügung stehen, abgesehen von der Schwierigkeit der Beschaffung geeigneter Belastungswiderstände. In diesen Fällen bleiben zur experimentellen Ermittelung der eintretenden Temperaturerhöhungen folgende zwei Verfahren: Die in **87** besprochene Zurückarbeitungsmethode bei Vorhandensein zweier gleicher Maschinen und dort, wo diese, wie wohl sehr häufig, nicht anwendbar ist, die künstliche Belastung oder die Erzeugung der normalen Stromwärme $J^2 \cdot R_a$ durch blinde Leistung oder Sparschaltung. Da die Temperatur der Maschine sowohl von den Eisen- als von den Kupferverlusten abhängt, so muß die Maschine zur Erzeugung der Eisenverluste bis auf volle Spannung $\tilde{E}_o$ erregt werden, hingegen können die Verluste in der Ankerwickelung durch Heizen derselben mit Gleichstrom erfolgen, falls dies durch eine geeignete Schaltung ohne starke Feldverzerrung oder Änderung der Ankerreaktion möglich ist. Hierbei ist auf zwei Punkte zu achten. Einmal muß der Heizstrom $\overline{J}$ etwas höher gewählt werden als der normale Belastungsstrom $\tilde{J}$, und zwar so viel, daß etwa $\tilde{J}^2 \cdot \tilde{R}_a = \overline{J}^2 \cdot \overline{R}_a$ wird, da der wirksame Widerstand $\tilde{R}_a$ bei Wechselstrombelastung erheblich größer ist als $\overline{R}_a$ (siehe hierzu in **81**). Ein zweites Mal soll die Gleichstromquelle so geschaltet werden können, daß sie keiner erheblichen Spannung des Wechselstromerzeugers

ausgesetzt ist (vgl. hierzu GOLDSCHMIDT, ETZ 1901, 682), eine Forderung, die im allgemeinen nur bei Dreieckschaltung von Drehstromerzeugern erfüllbar ist, wenn die Gleichstromquelle nach Fig. 179 in eine geöffnete Dreieckspitze eingeschaltet wird, wobei wiederum die Beziehung $\bar{R}_a = \bar{E} : \bar{J}$ zur Ermittelung der Temperaturerhöhung dient. (Weitere Schaltungen siehe in **105** Fig. 205 u. 206.)

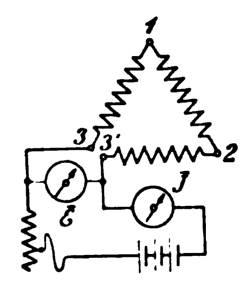


Fig. 179.

Eine angenäherte Bestimmung der zu erwartenden Übertemperatur T des Ankers bei Dauerbetrieb unter Volllast kann man auch durch Teilung von T in $T' + T''$ und getrennte Beobachtung von T' und T'' erhalten, wenn T' die nur von den Eisenverlusten herrührende Übertemperatur bezeichnet, T'' die nur von der Ankerstromwärme bedingte Übertemperatur. Man würde alsdann T' aus einem Dauerversuch bei Leerlauf und T'' aus einem Dauerversuch bei Kurzschluß mit normalem $\tilde{J}_a$ bestimmen.

C. Synchronmotoren.

91. V-Kurven bei Synchronmotoren.

Die Synchronmotoren bilden die Umkehrung der Wechselstromerzeuger, wie die vorstehenden Betrachtungen über die Untersuchung der Wechselstrommaschine bereits erkennen lassen (siehe in **86** und **87**). Daher gelten für sie auch alle Ausführungen über die Ermittelung der Spannungsverhältnisse, des Wirkungsgrades und der Temperaturerhöhung unverändert wie für die Wechselstromerzeuger. Bei dem Betrieb einer Wechselstrommaschine als Synchronmotor kommt aber zu den in **78** aufgeführten noch eine charakteristische Kurve hinzu, die den Zusammenhang zwischen der Erregerstromstärke $\bar{J}_\mu$ und dem aufgenommenen Ankerstrom $\tilde{J}$ bzw. dem Leistungsfaktor ($\cos\varphi$) des Synchronmotors als Konsumapparat darstellt. Wegen ihrer Gestalt bezeichnet man die $\tilde{J}, \bar{J}_\mu$-Kurve für konstante Tourenzahl n, konstante Klemmenspannung $\tilde{E}_M$ und konstante Belastung des Motors, d. i. hier abgegebene mechanische Leistung an der Welle, gewöhnlich kurzweg als V-Kurve (vgl. Fig. 180).

Zur Ermittelung der $\tilde{J}, \bar{J}_\mu$-Kurven und der ($\cos\varphi$), $\bar{J}_\mu$-Kurven von Synchronmotoren genügt die bereits in Fig. 173 bzw. 175 angegebene Schaltung der elektrischen Meßapparate. Nachdem die Parallelschaltung erfolgt und konstante Motorbelastung bei konstantem $\tilde{E}_M$ hergestellt ist, wird $\bar{J}_\mu$ innerhalb der zulässigen Grenzen, also gegebenenfalls bis zum Außertrittfallen des Synchronmotors variiert und durch Beobachtung von $\bar{J}_\mu$, $\tilde{J}$, $\tilde{E}$ und $\tilde{W}$ das Zahlenmaterial zur Aufstellung der Kurven gewonnen, wie sie Fig. 180 nach ARNOLD (Wechselstromtechnik Bd. IV, Seite 663) für einen 525 PS Dreiphasen-Synchronmotor der Maschinenfabrik OERLIKON für $\tilde{E}_M = 3500$ Volt, $n = 375$ in der Minute und $u = 50$ darstellt und zwar für Leerlauf (0), halbe ($^1/_2$) und volle ($^1/_1$) Belastung.

92. Arbeitskurven.

Die Arbeitskurven, wie sie Fig. 181 für denselben Motor abhängig von der Leistung an der Welle in PS darstellt, werden mit derselben elektrischen Schaltung wie oben, aber bei konstanter Erregung $\bar{J}_\mu$ entweder durch mechanische oder elektrische Bremsung bzw. Messung der abgegebenen Leistung bestimmt. Am besten benutzt man auch hier bei größeren Lei-

stungen zur Bestimmung der Abszissenwerte von Fig. 181 eine geeignete Gleichstromdynamo, womöglich für direkte Kuppelung, als Eichdynamo und erhält so eine Art Umkehrung der in 87 erwähnten Verhältnisse mit der Hilfsdynamo *II*.

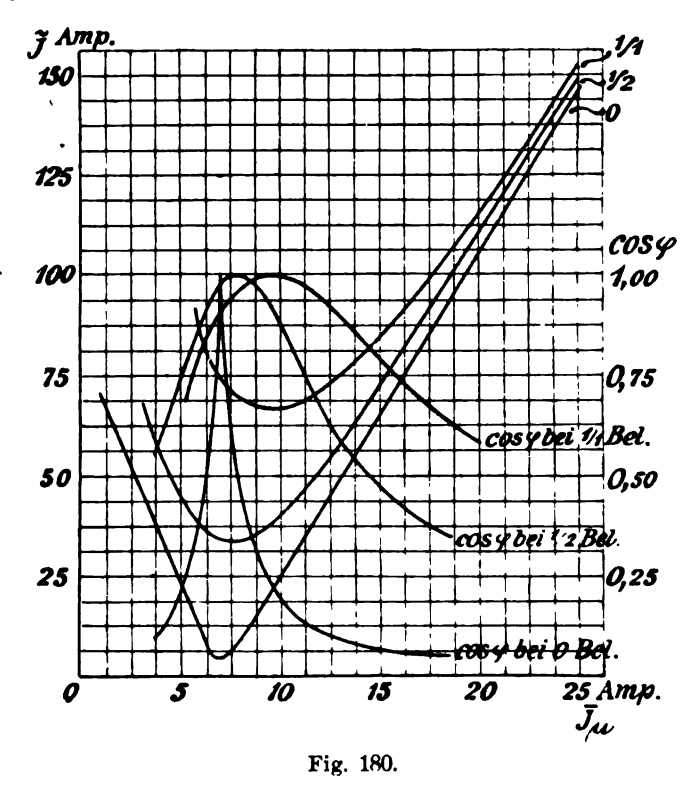


Fig. 180.

Handelt es sich nicht um einen Synchronmotor allein, sondern wie sehr häufig um ein Maschinenaggregat, bestehend aus Synchronmotor und direkt ge-

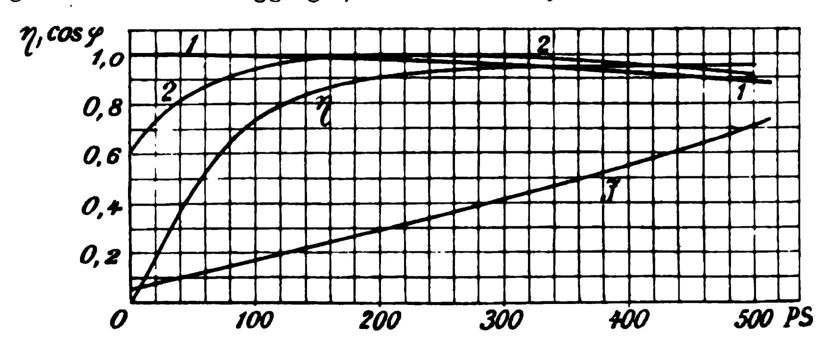
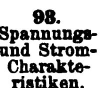


Fig. 181. Kurve 1 gibt cos φ für J_μ = 7·1 Amp.
Kurve 2 gibt cos φ für J_μ = 7·6 Amp.

kuppelter Gleichstrommaschine in Gestalt eines synchronen Motorgenerators, so liegen die Verhältnisse meßtechnisch weit günstiger, insofern für die Bestimmung des Wirkungsgrades bzw. der Wirkungsgradkurve des ganzen Aggregates nur das Verhältnis der beiden elektrischen Leistungen, d. i. der unmittelbar als $\bar{E} \cdot \bar{J}$ erhaltenen Gleichstromleistung zu der (wie in Fig. 173 bzw. 175

angegeben) gemessenen Wechselstromleistung $\tilde{W}$ zu ermitteln ist. Sollte sich völlig symmetrische Belastung der 3 Phasen nicht erzielen lassen, etwa deshalb, weil die zur Verfügung stehende Drehstromspannung nicht ausreichend symmetrisch ist, so hätte die Messung von $\tilde{W}$ nach den in **89** angeführten Schaltungen zu erfolgen.

D. Umformer.


98. Spannungs- und Strom-Charakteristiken.

Die unmittelbare elektrische Verbindung zwischen der Wechselstromseite und Gleichstromseite unterscheidet die Umformer zwar konstruktiv wesentlich von den Motorgeneratoren und bedingt eine weit größere Zwangläufigkeit in dem Verhältnis der beiderseitigen Spannungen (näheres siehe Hdb. Bd. V), meßtechnisch bleibt aber die Tatsache maßgebend, daß jeder synchrone Umformer eine Vereinigung von Synchron-Wechselstrommaschine und Gleichstrommaschine darstellt, wodurch Untersuchungen und Meßanordnungen im

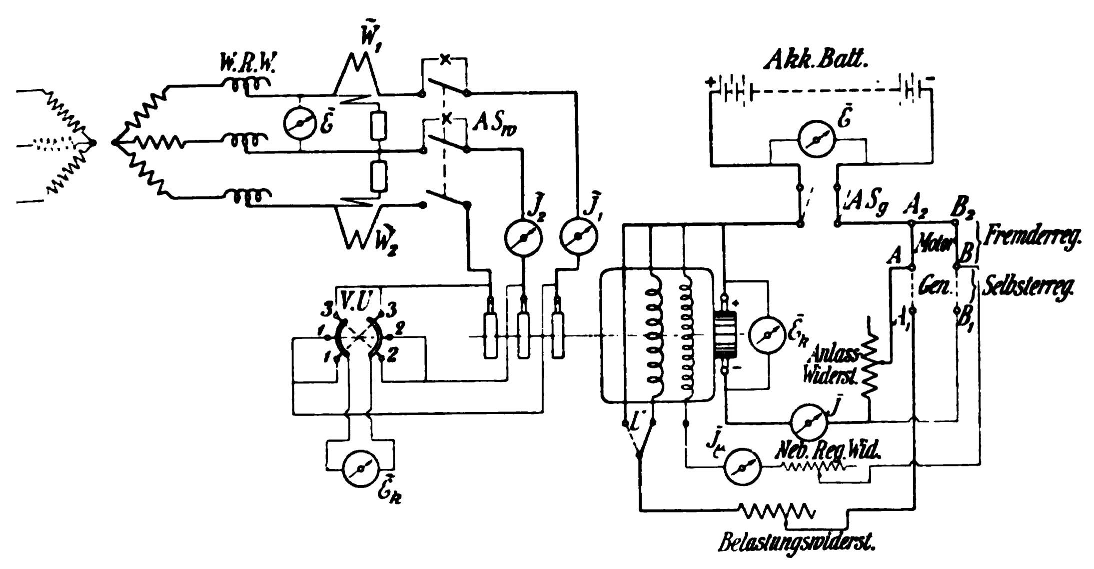


Fig. 182.

wesentlichen dieselbe Grundlage behalten wie im Vorausgegangenen. Die neu hinzutretenden Momente sollen kurz behandelt werden.

Um bei allen Untersuchungen am Umformer eine bequeme Umkehrung in den Betriebsverhältnissen, entweder von der Wechselstromseite, oder von der Gleichstromseite aus zu ermöglichen, ferner Fremd- und Selbsterregung, sowie bei letzterer Nebenschluß- und Verbunderregung durch einfache Umschaltung vornehmen zu können, benutzt man am besten die Meß- und Schaltungsanordnung nach Fig. 182 (vgl. ARNOLD, Wechselstromtechnik Bd. IV, Seite 820).

Die Leerlaufcharakteristik, welche hier neben der $\tilde{E}, \bar{J}_\mu$-Kurve auch die $\bar{E}, \bar{J}_\mu$-Kurve und für die Kontrolle der richtigen Verbindungen und Anschlüsse im Anker das Verhältnis von $\tilde{E}:\bar{E}$ für alle 3 Phasen zu liefern hätte, müßte eigentlich, wie in **80** angegeben, aufgenommen werden, d. h. mit mechanischem Antrieb des Umformers und mit Fremderregung, um alle Einflüsse durch Ankerrückwirkung von $\bar{J}$ zu vermeiden. Angenähert erhält

man die $\tilde{E}, \bar{J}_u$-Kurve aber auch noch, wenn man unter den gegebenen praktischen Verhältnissen auf den (vielfach nicht möglichen) mechanischen Antrieb verzichtet und den Umformer leer aus der Akkumulatorenbatterie als Motor mit Nebenschlußerregung laufen läßt. Außer n muß hierbei (vgl. Nr. 2 in **80**) auch die Bürstenstellung konstant bleiben.

Die äußeren Charakteristiken werden beim Betrieb des Umformers von der Gleichstromseite aus ganz ähnlich wie unter Nr. 3 in **78** bzw. **81** erhalten. Nach Umschalten auf $A_2 B_2$ (vgl. Fig. 182), d. h. bei Motorschaltung und Fremderregung, Ausschalten der Hauptstromerregerwickelung und Anlassen des Umformers von der Gleichstromseite, erfolgt das Einregulieren

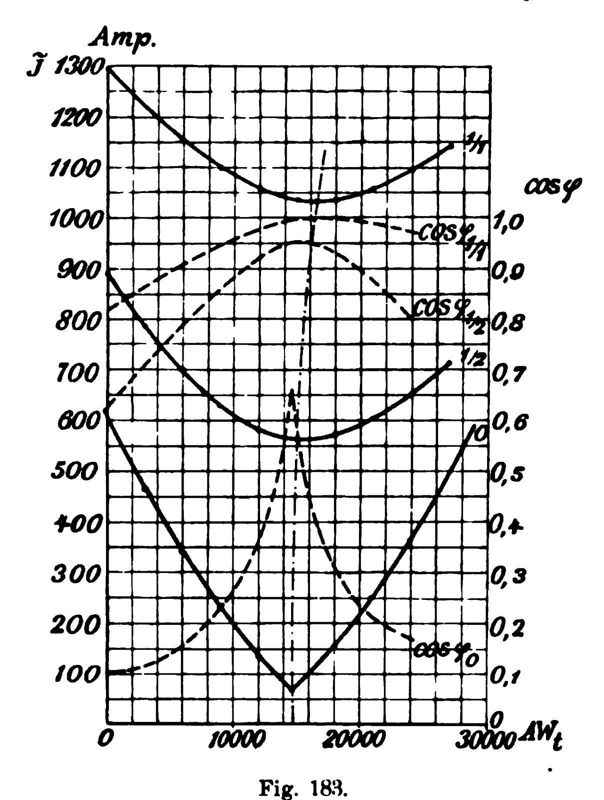


Fig. 183.

auf die gewünschte Klemmenspannung $\tilde{E}_k$ und Tourenzahl n bzw. Periodenzahl u durch Verändern von $\bar{J}_u$ und E_k. Bei Belastung der Wechselstromseite unter Beobachtung von $\tilde{J}$, $\tilde{W}$, $\tilde{E}_k$ bzw. $\cos\varphi$ wird der Nebenschlußregulierwiderstand und damit $\bar{J}_u$, ferner die Bürstenstellung am Kommutator unverändert gelassen, sowie E_k durch Nachregulieren am Anlaßwiderstand auf den Ausgangswert konstant gehalten. Die $\tilde{E}_k, \tilde{J}$ bzw. $\tilde{E}_k, \tilde{W}$-Kurven für verschiedene Werte von $\cos\varphi$ werden, wie in **81** angegeben, erhalten und aus ihnen der Spannungsabfall bzw. die Spannungserhöhung in entsprechender Weise bestimmt.

Wird der Umformer (in der meist normalen Schaltung) von der Wechselstromseite aus betrieben, so liegen die Verhältnisse etwas anders und sind mannigfaltiger. Nach dem Parallelschalten mit Hilfe der Synchronisiervorrichtungen (vgl. Hdb. IV, Aufl. II in **221** ff.) wird zunächst auf $A_1 B_1$ (Fig. 182), d. h. Generatorstellung und Selbsterregung, umgeschaltet und für

$\bar{J} = \bar{J}_a$, d. i. bei geöffnetem Belastungsstromkreis, auch hier $\bar{J}_u$ so einreguliert, daß $\bar{E}_k$ den gewünschten Ausgangswert annimmt. Hierauf werden bei unveränderter Stellung des Nebenschlußregulierwiderstandes getrennte Versuchsreihen für Nebenschlußerregung bei ausgeschalteter Hauptstromerregerwickelung und für Verbunderregung durchgeführt, wobei stets die zugeführte Wechselspannung $\tilde{E}_k$ mit Hilfe der Wechselstromregulierwiderstände $W.R.W.$ auf ihrem konstanten Ausgangswert gehalten wird, während $\bar{E}_k$ und $\bar{J}$ sowie auch das hier etwas veränderliche $\bar{J}_u$ beobachtet werden. Die $\bar{E}_k, J$-Kurven liefern dann die äußeren Charakteristiken, welche je nach der Erregungsart bzw. dem Kompoundierungsgrad den Spannungsabfall, oder bei Überkompoundierung die Spannungserhöhung mit wachsender Belastung ($\bar{J}$) abzugreifen gestatten.

Seinem Charakter als Synchronmaschine entsprechend erfolgt die Aufnahme der sogenannten V-Kurven oder $\tilde{J}, \bar{J}_u$-Kurven, sowie der $\cos\varphi, \bar{J}_u$-Kurven (bei konstant gehaltener Klemmenspannung $\tilde{E}_k$ und Belastung $\bar{J}$) bei unveränderter Bürstenstellung unter Benutzung der Schaltung von Fig. 182 in Übereinstimmung mit dem in **91** angegebenen Verfahren. Die energetischen Verhältnisse bedingen hierbei, daß die Änderung abhängig von $\bar{J}_u$ um so geringer ausfällt, je größer die Belastung ist, wie Fig. 183 erkennen läßt, welche als Beispiel die an einem 125 KW Umformer gefundenen Werte nach Parshall und Hobart (Electric Generators) wiedergibt.

94. Wirkungsgradbestimmungen.

Für die Wirkungsgradbestimmungen von Umformern wird unter Beibehaltung der in Fig. 182 angegebenen Meßanordnung die unmittelbare Methode der Bestimmung von η zu

$$\eta = \frac{\bar{W}}{\tilde{W}} = \frac{\bar{E}_k \cdot \bar{J}}{\tilde{W}_1 + \tilde{W}_2}$$

weit eher in Frage kommen als bei Erzeugern, weil beide Leistungen, nämlich die Gleichstromleistung $\bar{E}_k \cdot \bar{J}$ und die aus der Summe der beiden Wattmeterangaben zu $\tilde{W}_1 + \tilde{W}_2$ folgende Wechselstrom- bzw. Drehstromleistung durch elektrische Messungen erhalten werden (vgl. hierzu in **86**). Bei Umformern mit kleineren Leistungen und η-Werten unterhalb 90 % wird man wohl daher diese Bestimmung meist anwenden. Für größere Leistungen und höhere η-Werte wird aber die Beschaffung der vollen Leistungen im Laboratorium oft Schwierigkeiten machen und außerdem werden die in **86** angeführten meßtechnischen Überlegungen eine mittelbare Bestimmung von η aus den Messungen der Verlustgrößen vorteilhafter erscheinen lassen. Die beiden alsdann in Frage kommenden Methoden sind wiederum, wie bei den Erzeugern, die Zurückarbeitungsmethode oder Gegenschaltung bei der gleichzeitigen Untersuchung zweier gleicher Umformer und die Messung der Leerlauf- und Kupferverluste bei einzelnen Umformern.

Die Zurückarbeitungsmethode unterscheidet sich bei Umformern insofern von der Anordnung bei mechanisch-elektrischen Synchronmaschinen (vgl. Fig. 173 in **87**), als anstelle der mechanischen Kuppelung die elektrische der Gleichstromseiten beider Umformer tritt und damit in Zusammenhang der Hilfsmotor H zur Deckung der Verluste beider Maschinen durch eine elektrische Gleichstromquelle, am besten Akkumulatorenbatterie, unmittelbar ersetzt werden kann, wie die Schaltungsskizze der Fig. 184 nach Arnold (Wechselstromtechnik, Bd. IV, Seite 825) erkennen läßt. Bei Umformern mit Verbunderregung ist die Hauptstromwickelung abzuschalten. Bei völliger

Gleichheit der beiden Umformer und elektrischer Kuppelung von Gleich- und Wechselstromseiten ist aber ohne weiteres eine Belastung nicht ausführbar, da die Wechselstromspannungen von U_1 und U_2 sehr nahe gleich und $\tilde{J}$ nahezu Null wird. Um die Belastung beider Umformer mit verschiedenen Stromstärken $\tilde{J}$ und Leistungsfaktoren $\cos\varphi$ zu ermöglichen, muß daher zwischen U_1 und U_2 ein Halbtransformator (auch Autotransformator genannt) eingeschaltet werden, der eine schrittweise Erhöhung der Wechselspannungen, welche U_2 zugeführt werden, zuläßt, bis $\tilde{J}$ die gewünschte Höhe erreicht. Wird alsdann die den Kollektorseiten zugeführte Gleichspannung $\bar{E}_k$ gemessen, ebenso die von U_2 auf U_1 übertragene Gleichstromstärke $\bar{J}$, ferner der

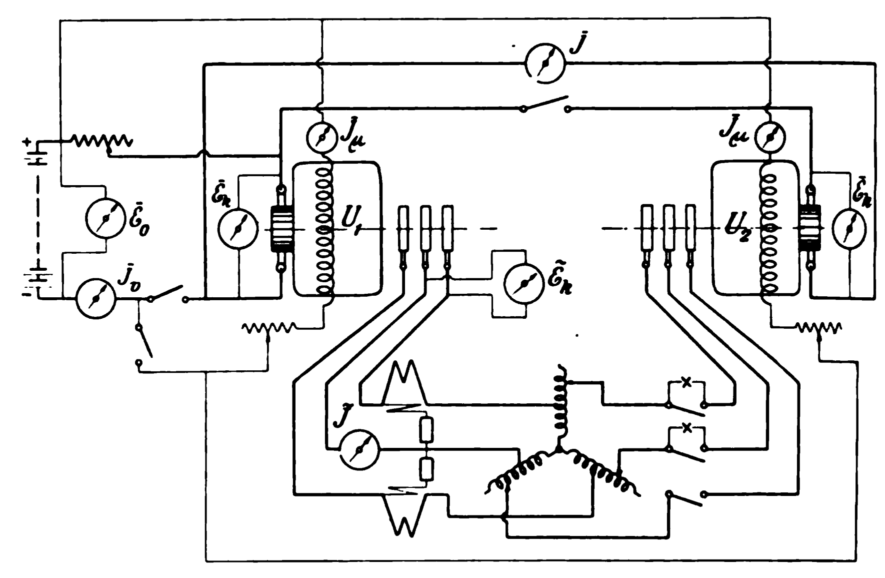


Fig. 184.

zur Deckung der Verluste erforderliche Gleichstrom $\bar{J}_v$ aus der Akkumulatorenbatterie, so erhält man für die Gesamtverluste W_v jedes Umformers die Bestimmungsgleichung

$$\bar{E}_k \cdot \bar{J}_v - \tilde{W}_{tr} = 2\, W_v,$$

wenn $\tilde{W}_{tr}$ die gesondert bestimmten Verluste im Halbtransformator (vgl. 107) bezeichnet. Hieraus folgt

$$W_v = \frac{\bar{E}_k \cdot \bar{J}_v - \tilde{W}_{tr}}{2}$$

und der gesuchte Umformerwirkungsgrad

$$\eta = \frac{\bar{W}}{\bar{W} + \bar{W}_v} = \frac{\bar{E}_k \cdot \bar{J}}{\bar{E}_k \cdot \bar{J} + \frac{\bar{E}_k \cdot \bar{J}_v - \tilde{W}_{tr}}{2}}$$

oder angenähert

$$\eta = \frac{\bar{J}}{\bar{J} + \frac{\bar{J}_v}{2}},$$

da $\tilde{W}_{tr}$ sehr klein gewählt werden kann. Diese Formel für Parallelschaltung von Umsetzungsapparaten ist hier ausreichend zutreffend, da nur für die

Kupferverluste der beiden Umformer die Reihenschaltung vorliegt (vgl. hierzu in **106**).

Bei Einzelumformern muß W'_v für sich bestimmt werden. Man verfährt hierbei in ganz entsprechender Weise, wie in **88** angegeben, nur ist zu berücksichtigen, daß zu den dort angeführten Gliedern von W_v noch zwei hinzutreten, welche durch den Kollektor bzw. durch die Hauptstromwickelung mit dem Widerstand R_h bedingt sind, so daß die Erregerverluste $\overline{J}_\mu \cdot \overline{E}_k + \overline{J}^2 \cdot R_h$ werden und die Kollektorverluste W'_k, durch Übergangs- und Kurzschlußverluste bedingt, wie bei den Gleichstrommaschinen (siehe Hdb. II, 1 in **222**) ermittelt werden.

95. Feld- und Spannungskurven. Die Aufnahme von Feldkurven und Spannungskurven abhängig von der Belastung wird bei Umformern auch am besten von der Gleichstromseite aus erfolgen, etwa in der Weise wie Hdb. II, 2 in **221**, Fig. 307 angegeben. Die Vorrichtung zur Aufnahme der Spannungskurve durch Messung der Spannung zwischen einer Betriebsbürste und einer verschiebbaren Hilfsbürste, wie sie dort angegeben wurde, wird zur Aufnahme der Feldkurven durch eine der folgenden zwei Anordnungen ersetzt: Man kann zwei Prüfbürsten benutzen, die einen konstanten Abstand von Kollektorlamellenbreite + Zwischenisolation beibehalten und rings um den Kollektor um aneinander anschließende Strecken verschoben werden. Mißt man mit Hilfe eines geeigneten Gleichspannungsvoltmeters die Teilspannungen $\overline{E}_1$ zwischen B_1 und B_2, wie Fig. 185 andeutet, so liefert $\overline{E}_1 \pm \overline{J}_a \cdot R_1$ ein Maß für die induzierte *EMK* in dem zwischen B_1 und B_2 belegenen Ankerwickelungsteil mit dem betriebswarmen Widerstand R_1, je nachdem der Umformer als Generator oder Motor mit dem Ankerstrom $\overline{J}_a$ läuft. Da diese *EMK* bei konstantem u und $\overline{J}_\mu$ ein Maß für die Feldstärke an dem von B_1 und B_2 eingeschlossenen Bogen α (vgl. Fig. 185) liefert, so ergeben alle Werte zwischen 2 Bürsten, zu den Stellungen der Prüfbürsten (als den Abszissenwerten) aufgetragen, die Feldkurve abhängig von der Arbeitsstromstärke $\overline{J}$, welche während der Versuchsreihe konstant zu halten ist.

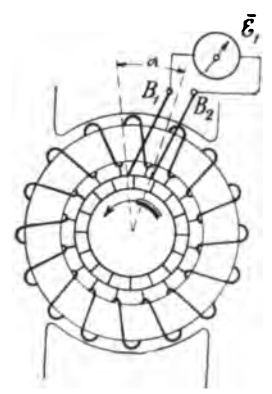


Fig. 185.

Die Durchführung bietet aber bei Anstrebung größerer Zuverlässigkeit mancherlei Schwierigkeiten und enthält außerdem in dem Korrektionsglied $\pm \overline{J}_a \cdot R_1$ eine weitere Unsicherheit. Will man diese umgehen, so wird man eine genügend schmale Hilfswickelung vorziehen, welche auf dem Anker fest aufgebracht wird und mitrotiert. Die in ihr induzierte *EMK* wird mit Hilfe zweier Schleifringe und eines verschiebbaren Kontaktapparates, der nach Art der Kontaktmacher (siehe **53**) angetrieben wird, gemessen und wie oben zur Zeichnung der Feldkurve benutzt.

Neben den Synchronumformern kämen noch die Asynchronumformer oder Kaskadenumformer in Frage; bezüglich der Messungen stellen sie aber eine Vereinigung von Asynchronmotor mit Gleichstromgenerator vor, die in der Hauptsache in der folgenden Behandlung der Asynchronmotoren mit enthalten ist. Auch die Doppelstromgeneratoren erfordern nur eine Vereinigung der im vorstehenden und in Hdb. II, 1 angeführten Meßanordnungen.

E. Asynchronmotoren.

96. Allgemeines. Die Asynchronmotoren sind ihrer Konstruktion und inneren Einrichtung nach außerordentlich mannigfaltig, wie ihre Behandlung in Hdb. IX, 1 erkennen läßt. Für die Messung handelt es sich aber im allgemeinen nur um die experimentelle Prüfung der hierdurch erzielten Ergebnisse und die von ihnen bei verschiedenen Betriebsverhältnissen aufgenommenen elektrischen Größen im Zusammenhang mit der von ihnen abgegebenen mechanischen Leistung und dem entwickelten Dreh- oder Anzugsmoment.

Auch hier werden die bereits in **75** angeführten zwei Richtungen der Untersuchungen zu unterscheiden sein. Einerseits wird es sich um die Einhaltung der in den Normalien getroffenen Festsetzungen handeln, soweit die Durchschlagsfestigkeit der Isoliermaterialien und die Erwärmung bzw. Übertemperatur von Kupfer und Eisen bei Dauerbelastung in Frage steht. Diese Messungen werden in ganz entsprechender Weise wie bei allen übrigen Maschinen auszuführen sein (vgl. auch in **105**). Andererseits werden in Zusammenhang mit den Leistungsverhältnissen alle wichtigeren elektrischen und mechanischen Größen zu messen sein, was zum Teil besondere Meßanordnungen erfordert.

Neben der Messung der — im normalen Betriebe gewöhnlich konstant gehaltenen — zugeführten Spannung $\tilde{E}$ wird elektrisch noch die vom Motor aufgenommene Stromstärke $\tilde{J}$, sowie mit Hilfe eines oder zweier Wattmeter (siehe **63 ff.**) die benötigte Leistung $\tilde{W}$ zu ermitteln sein. Von den mechanischen Größen wird die abgegebene Nutzleistung entweder mit Hilfe einer geeichten Gleichstromdynamo (vgl. **92**) oder einer Bremsung in ganz entsprechender Weise festgestellt, wie dies bereits Hdb. II, 1 in **210** ausführlicher angegeben wurde. Mit denselben Vorrichtungen erfolgt auch die Ermittelung des Drehmomentes und des Anzugsmomentes. Zur Messung der Leistung aus Drehmoment und Geschwindigkeit wird die Tourenzahl nach einer der Hdb. II, 1 in **211** angegebenen Methoden bestimmt. Häufig werden bei Asynchronmotoren aber nicht die Tourenzahlen selbst, sondern die Differenz- oder Schlupftouren abhängig von der Belastung aufgetragen, deren Ermittelung nach einer der in **46** bis **50** angeführten Methoden erfolgt.

Die erhaltenen Einzelbeobachtungen werden am besten graphisch aufgetragen und aus den erhaltenen Punkten unter gleichzeitiger Anwendung des graphischen Interpolationsverfahren (siehe II, 1 in **5**) die Betriebskurven erhalten, welche die Eigenschaften des Motors am besten und raschesten charakterisieren und dem Kundigen ohne weiteres auf einen Blick mehr sagen als eine lange Beschreibung oder Diskussion der Tabellenwerte. Als unabhängige Veränderliche oder Abszisse wird hierbei entweder die dem Motor zugeführte elektrische Leistung $\tilde{W}$ in Kilowatt, oder auch bei konstant gehaltener Klemmenspannung $\tilde{E}_k$ die von ihm aufgenommene Stromstärke $\tilde{J}$ gewählt, während die übrigen Werte — entweder nach den direkten Beobachtungen oder aus diesen rechnerisch abgeleitet — als Ordinaten aufgetragen die charakteristischen Betriebskurven liefern (vgl. hierzu die Fig. 191 und 197 bis 203 sowie weiterhin in Bd. IX, 1). Als olche kommen in erster Linie hier in Betracht: die Kurve für den Wirkungsgrad η des Motors und für die abgegebene Leistung in PS, ferner die Kurve für das Drehmoment bzw. Anzugsmoment des Motors in mkg, sowie die Kurve für die Tourenzahl oder auch für die prozentuale Schlüpfung bei konstanter

Periodenzahl oder Drehfeldgeschwindigkeit. Neben diesen namentlich für den Motorbesitzer bedeutungsvollen Kurven, die womöglich bis zur Maximalleistung oder bis zum Abschnappen des Motors durchgeführt werden, um gleichzeitig diesen betriebstechnisch wichtigen Punkt zu charakterisieren, ist für den Anlagenbesitzer, bzw. das Elektrizitätswerk noch die Kurve des Leistungsfaktors, als des Verhältnisses der aufgenommenen bzw. bezahlten Kilowatt $\tilde{W}$ zu den zugeführten Kilovoltampere $\tilde{E} \cdot \tilde{J}$, sowie die Bestimmung der Anlaufstromstärke ohne oder mit Anlaßtransformator von Wert.

Neben diesen Kurven zur Charakterisierung des aus der Konstruktion resultierenden Motorverhaltens, soweit es in erster Linie für den Betrieb wichtig ist, werden den Konstrukteur zur Beurteilung der Einzelheiten noch eine Reihe weiterer Werte und Kurven interessieren. Zur Spezialisierung des Wirkungsgrades werden dies namentlich die Kurven der Einzelverluste sein, wie der Eisenverluste, ferner der Kupferverluste gesondert in Ständer- und Läuferverluste, endlich der mechanischen Reibungsverluste usf. Als Grundlage für das Kreisdiagramm — sei es zur Konstruktion desselben durch den Nichtkonstrukteur, sei es zur Kontrolle des Entwurfes durch den Konstrukteur — werden weiterhin Ermittelungen der Streuungskoeffizienten durch besondere Spannungsmessungen, sowie der Magnetisierungsstromstärke bei Synchronismus und der Kurzschlußstromstärke und -Watt bei feststehendem, kurzgeschlossenem Rotor abhängig von der Klemmenspannung $\tilde{E}_k$ wichtig sein. Weiteres über die Auswertung dieser Größen und ihre Rolle als Grundlagen der Theorie siehe Hdb. V, ferner auch Hdb. IX.

97. Einphasenmotoren. Induktionsmotoren.

Die Einphasenmotoren werden als elektrische Meßanordnung zunächst ein passendes Wattmeter nebst Voltmeter und Amperemeter zur Ermittelung der zugeführten Einphasenleistung und ihrer Einzelfaktoren, einschließlich des Leistungsfaktors, in der in **63** angegebenen Schaltung erfordern, nötigenfalls unter Beachtung der aus den verschiedenen Schaltungsmöglichkeiten (Fig. 136 in **63**) sich ergebenden Meßkorrektionen.

Die Untersuchungen und sonstigen Meßinstrumente werden aber teilweise verschieden ausfallen, je nachdem es sich um einen Einphaseninduktionsmotor handelt, der mit Hilfsphase anläuft, oder auch bei dauernder Einschaltung der letzteren, etwa wie der Kondensatormotoren der Gen.-El.-Comp., überhaupt als Zweiphasenmotor arbeitet, oder ob ein Einphasenkollektormotor vorliegt.

Für den normalen Betrieb werden zwar auch hier bei beiden Motorarten die Untersuchungen über den Wirkungsgrad und über die abgegebenen nutzbaren PS und Drehmomente, sowie die Leistungsfaktorkurve in übereinstimmender Weise erfolgen, soweit eben nur die Ablesungen $\tilde{E}$, $\tilde{J}$ und $\tilde{W}$ (an der obenerwähnten gemeinschaftlichen Meßanordnung für die zugeführten elektrischen Gesamtwerte) in ihrer Beziehung zu den mechanisch wichtigen Beobachtungsgrößen, wie nutzbares, bzw. benutzbares Drehmoment, Tourenzahl bzw. Schlüpfung und Anzugsmoment beim Anlassen, in Frage stehen. Bei letzterem werden aber bereits infolge des sehr verschiedenen Verhaltens der einzelnen Motortypen oder der Schaltweisen für das Anlassen gewisse Differenzierungen der Meßgrößen erwünscht erscheinen, namentlich insoweit die Teilstromstärken gegenüber der zugeführten ungeteilten Stromstärke $\tilde{J}$ in Frage kommen.

So wird man bei Motoren mit 2 Phasenwickelungen A und H — sei es zum Anlassen mittels Arbeitswickelung und Hilfswickelung, sei es zum Dauerbetrieb als Zweiphasenmotor — die Stromteilungs- und Phasen-

verschiebungsverhältnisse etwa durch die Meßanordnung der Fig. 186 untersuchen, indem man neben der Summenstromstärke $\tilde{J}_1$ und ihrer äquivalenten Phasenverschiebung φ gegenüber $\tilde{E}$ noch die beiden Teilstromstärken $\tilde{J}_A$ und $\tilde{J}_H$ mißt und mit Hilfe dieser 3-Amperemetermethode nicht nur das Stromdreieck und die erzielte Phasenverschiebung $\varphi_{1,2}$ zwischen $\tilde{J}_A$ und $\tilde{J}_H$ feststellt (Fig. 187), sondern auch mit Hilfe von $\cos\varphi = \tilde{W} : \tilde{E} \cdot \tilde{J}$ bzw. von φ die Lage des Stromstärkedreiecks gegenüber $\tilde{E}$, d. h. die Leistungsverhältnisse in den Zweigleitungen ermittelt. Für einen Läufer mit Anlaßwiderstand wird man gleichzeitig die Läuferstromstärke $\tilde{J}_2$ ermitteln, entweder

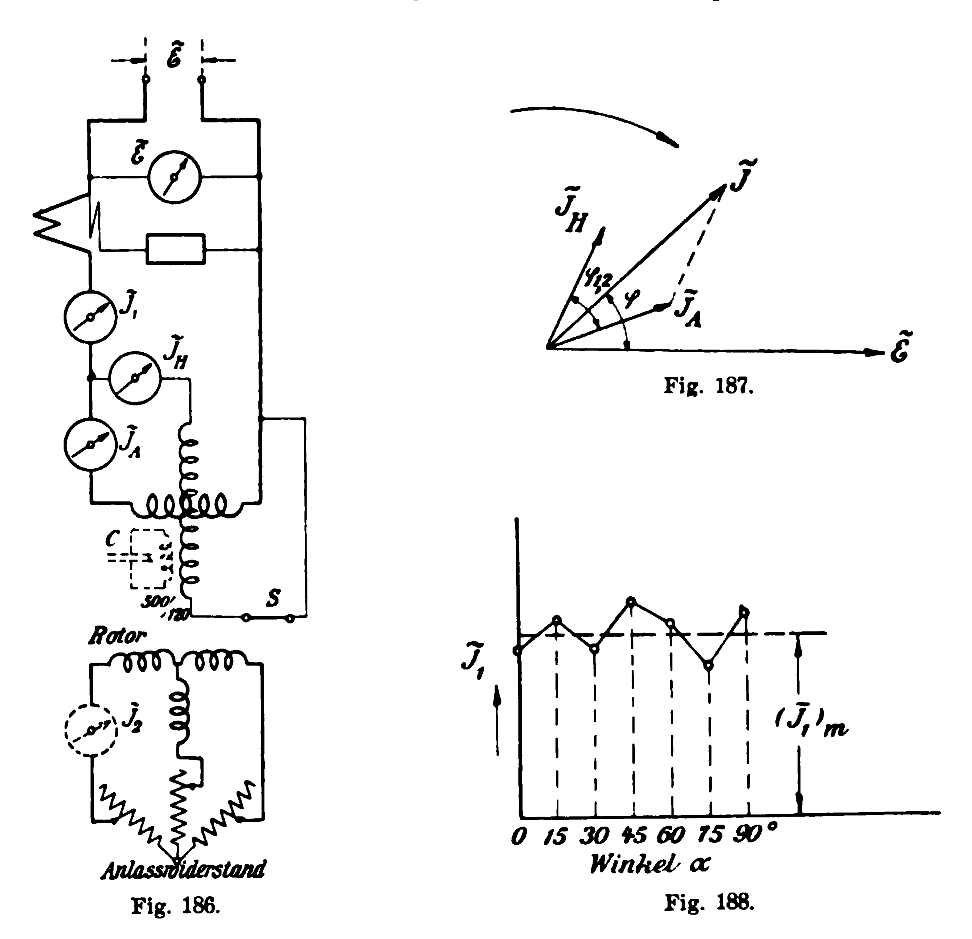


Fig. 186. Fig. 187. Fig. 188.

durch direktes Einschalten eines geeigneten Amperemeters, wie in Fig. 186 angedeutet, oder, falls dies aus irgend einem Grunde nicht durchführbar ist, mit Hilfe eines kleinen Stromtransformators, etwa des leicht beweglichen Dietze-Anlegers (vgl. 7). Allerdings ist die dadurch bewirkte zusätzliche Reaktanz des betreffenden Zweiges und die hieraus folgende Unsymmetrie bzw. Stromverdrückung in den Fällen kleiner Wechselstromwiderstände der Läuferkreiszweige nicht außer acht zu lassen.

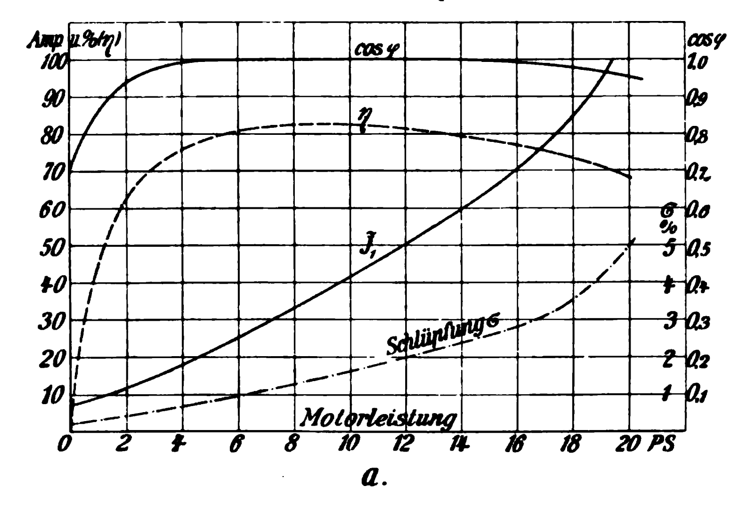
Handelt es sich nicht um die Untersuchung von dauernden Betriebsverhältnissen bei Zweiphasenwickelungen, sondern um verhältnismäßig rasch verlaufende Anlaßverhältnisse bei nur vorübergehend eingeschalteten Hilfswickelungen, so müssen alle Amperemeter nicht nur auf Kommando im

gleichen Augenblick abgelesen werden, sondern es muß auch dafür gesorgt werden, daß alle Amperemeter — etwa Hitzdrahtinstrumente — aperiodische Zeigerbewegung bei entsprechender Einstellungsdauer aufweisen, weil sonst die Beobachtungswerte nicht zueinander passen und zu falschen Schlüssen bezüglich φ Veranlassung geben.

Wird der Motor bei stillstehendem Läufer als Transformator untersucht (vgl. hierzu **105** bis **109**), so ist bei Messung der Stromstärken $\tilde{J}_1$ und $\tilde{J}_2$

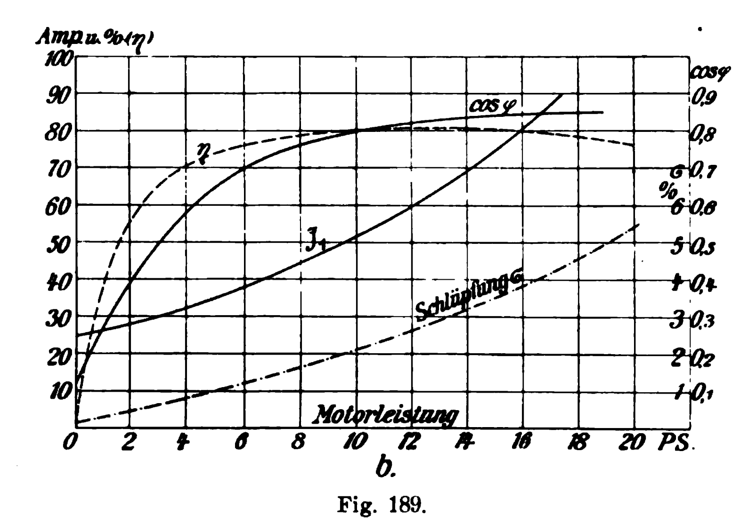


Motor der General Electric Comp. mit Kondensator.



a.

Motor der Siemens-Schuckert-Werke ohne Kondensator.



b.

Fig. 189.

(Fig. 186) zu beachten, daß diese auch bei zugeführter konstanter Spannung $\tilde{E}_1$, die gewöhnlich bis zu etwa 10 bis 15 % der normalen Betriebsspannung zu wählen ist, nicht unabhängig von der Phasenstellung des Läufers ist, namentlich wenn dieser einen Kurzschlußanker besitzt. Trägt man die alsdann gewöhnlich der direkten Messung allein zugängliche Stromstärke $\tilde{J}_1$ abhängig von der durch Winkelgrade (räumliche oder elektrische) charakterisierten Läuferstellung auf, so erhält man wegen Änderung der Trans-

formations- und Streuungsverhältnisse des Kurzschlußtransformators (vgl. 104) für $\tilde{J}_1$ eine Zickzackkurve. Dasselbe gilt in erhöhtem Maße von dem Drehmoment D (bei Drehfeldmotoren). Will man einen Mittelwert $(\tilde{J}_1)_m$ nicht graphisch aus jener Zickzackkurve ermitteln (siehe Fig. 188), sondern direkt durch Messung, so muß man dem Läufer eine solche Drehgeschwindigkeit — am

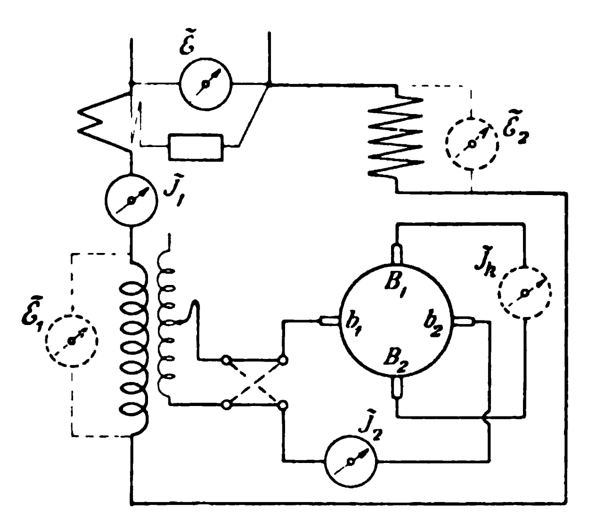


Fig. 190.

besten von Hand — erteilen, daß ein geeignetes (Hitzdraht-)Instrument die Integration ausführt, jedoch ohne daß merkliche EMKK in den Wickelungen durch jene langsame Bewegung hervorgerufen werden.

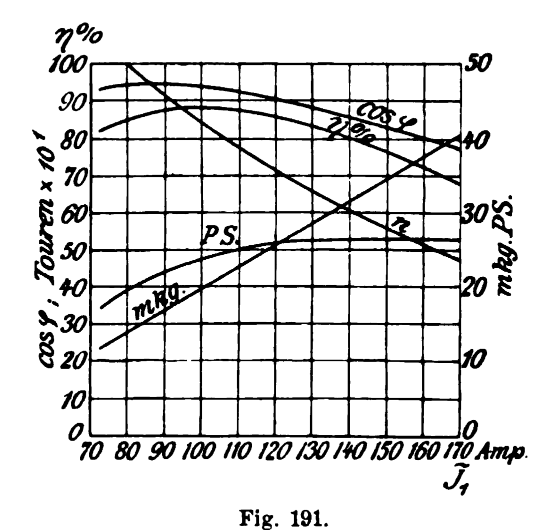


Fig. 191.

Weitere Untersuchungen über das Drehmoment abhängig von der Phasenstellung und von der Größe des Anlaßwiderstandes, sowie über die Streuungsverhältnisse des Motors und über die Einzelverluste im Motor sind im wesentlichen übereinstimmend mit den Feststellungen dieser Größen bei Drehstrommotoren, so daß hierauf (99 ff.) verwiesen sei.

Die Untersuchung etwaiger Transformationsverhältnisse bei der Hilfswickelung, wie z. B. bei den Kondensatormotoren mit Zweiphasenwickelung (Fig. 186), hätte gesondert zu erfolgen (siehe **105** ff.). Die erhaltenen Werte werden für die wichtigeren Größen graphisch aufgetragen, etwa wie dies in Fig. 189 geschehen ist, die den Vergleich der Dauerbetriebskurven für zwei nominell etwa gleichwertige Einphasenmotoren ermöglicht, von denen der eine (b) ohne zweite Hilfswickelung, der andere (a) mit Hilfswickelung und Kondensator, etwa nach dem Schema der Fig. 186, arbeitet.

98. Einphasen-Kollektormotoren.

Die Untersuchung eines Einphasenkollektormotors, etwa eines Winter-Eichberg-Motors könnte mit der Meßanordnung in Fig. 190 erfolgen. Für die Aufstellung der wichtigsten Betriebskurven, wie sie Fig. 191 (aus ETZ 1904, 80) für einen solchen Motor wiedergibt, genügen neben der Messung der mechanischen Größen, nämlich Tourenzahl n, abgegebene Leistung in PS und Drehmoment $D = \frac{c \cdot PS}{n}$ in kg $\times$ m, die Messung der 3 elektrischen Hauptgrößen, von denen $\tilde{E}$ (= 218 Volt in Fig. 191) wie gewöhnlich konstant bleibt oder gehalten wird, während $\tilde{J}_1$ hier als Abszisse aufgetragen wurde und $\tilde{W}_1$ zur Bildung der Wirkungskurve $\eta = \frac{PS}{1{\cdot}36\,\tilde{W}_1}$ dient, wenn die vom Motor aufgenommene Leistung $\tilde{W}_1$ in Kilowatt eingesetzt wird. Zur näheren Kenntnis des Motors, sowie seines Verhaltens beim Anlaufen, werden aber weiterhin noch die Messung des Verlaufes der beiden Stromstärken $\tilde{J}_2$ und $\tilde{J}_k$, sowie der Teilspannungen $\tilde{E}_1$ und $\tilde{E}_2$ beitragen können, wenn sie entweder in möglichst rasch aufeinander folgenden Zeitpunkten g l e i c h z e i t i g abgelesen, oder auch selbsttätig registriert werden. Die Messung der Stromstärke $\tilde{J}_k$ in der Kurzschlußleitung zwischen den Bürsten B_1 B_2 wird wohl auch hier am besten mittels eines leicht beweglichen Stromtransformators, etwa eines Dietze-Anlegers, erfolgen. Die Ermittelungen der Teilspannungen $\tilde{E}_1$ am Reguliertransformator und von $\tilde{E}_2$ an den Enden der Ständerwickelung werden auch hier mit der Gesamtspannung $\tilde{E}$ zusammen das Spannungsdreieck und mit Hilfe der Messungen von $\tilde{W}_1$ und $\tilde{J}_1$, ähnlich wie im Diagramm der Fig. 187, Aufschluß über die Phasenverschiebungen im Zeitpunkt der Beobachtung geben. Die Bemerkung wegen Aperiodizität und Einstellungszeit der Meßinstrumente (vgl. in **97**) gilt hier in erhöhtem Maße.

99. Drehstrommotoren. Meßschaltungen.

Die Meßanordnung zur Untersuchung von Drehstrommotoren wird gegenüber der Anordnung bei Einphasenstrom nur auf die Vermehrung und Verkettung der Phasen Rücksicht zu nehmen haben, ein Moment das namentlich bei der Leistungsmessung zu berücksichtigen ist, wie bereits früher in **70** und in **71** (bei Fig. 158) betont. Naturgemäß wird die Messung der elektrischen Seite beim Motor im wesentlichen Übereinstimmung aufweisen mit derjenigen beim Erzeuger, als der Umkehrung des Konsumapparates, also im Schaltungsschema Ähnlichkeit mit dem Schema der Fig. 176 besitzen. Doch sind hier in den meisten Fällen Vereinfachungen möglich wegen der Symmetrie der Motorwickelungen und der dadurch bei symmetrischen Spannungsverhältnissen vorhandenen Gleichheit der Aufnahme an elektrischer Leistung. Immerhin wird man aber auch hier aus den in **71** angeführten Gründen höchstens bei der Strom- und Spannungsmessung diese vereinfachte Schaltung, d. i. Messung nur in einer Leitung bzw. zwischen zwei Leitungen vornehmen, wie Fig. 192 gegenüber Fig. 176 andeutet.

Bei der Leistung wird man aber für genauere Bestimmungen sich auf

die Symmetrie der Belastung nicht verlassen können und zu diesem Zweck eine der in **70** bis **72** angeführten Mehrwattmetermethoden benutzen. Durch Einführung der direkt ablesbaren, gut gedämpften Leistungszeiger in Verbindung mit einem Leistungsmesserumschalter, der rasche, selbsttätig richtige Reihenfolge der Schaltoperationen sichert, bürgert sich aber immer mehr die in **72** beschriebene Zweitwattmetermethode, jedoch unter Benutzung nur

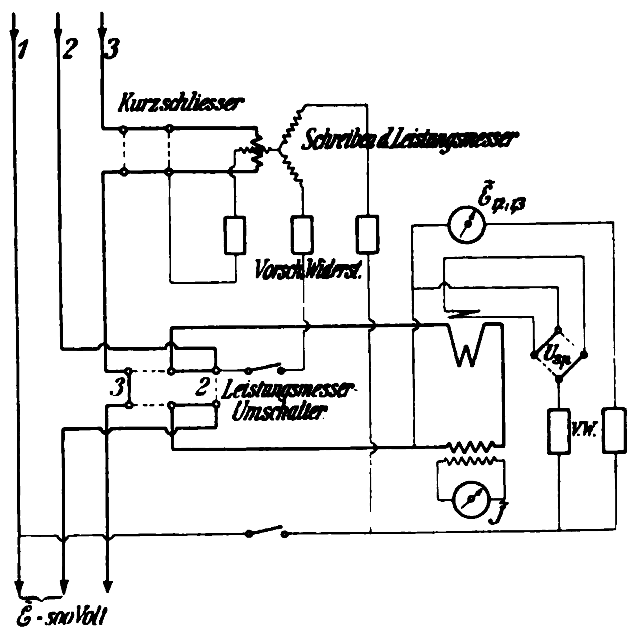


Fig. 192.

eines Wattmeters und Umschaltung der Hauptstromwickelung ein, welche auch im Schema der Fig. 192 angenommen worden ist. Nur tritt hier bei der Motorschaltung gegenüber der Erzeugerschaltung der Fig. 176 noch ein doppelpoliger Spannungsspulenumschalter U_{sp} hinzu, um bei Leerlaufmessungen an den

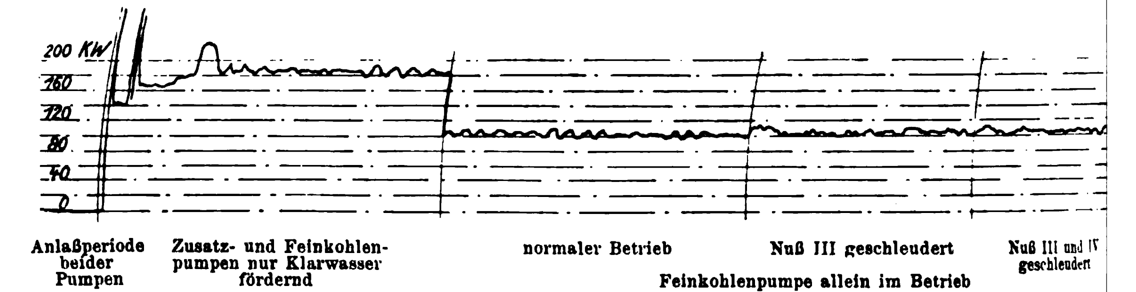


Fig. 193.

Motoren, d. h. bei geringen Leistungen und bei sehr kleinem Leistungsfaktor ($\cos \varphi$), auf bequeme Weise stets gleichgerichtete Wattmeterausschläge zu erhalten (vgl. in **71** bei Fig. 158).

Neben diesen Augenblicksmessungen der Intensitätswerte mit gleichzeitiger Ablesung aller beteiligten Meßinstrumente bzw. Meßgrößen ist in der Praxis bei Antriebsmotoren vielfach auch der Verlauf der Schwankungen in der

Leistungsaufnahme von großem Interesse, sei es, daß die Schwankungen während einer längeren Dauer des normalen Betriebes festgestellt werden sollen, sei es daß die größeren und rascher verlaufenden Schwankungen in den Anlaßperioden von Motoren und gekuppelten Arbeitsmaschinen, etwa



Fig. 194.

1. Leistungsmesser-Umschalter für die 2000 V Seite.
2. Leistungsmesser für die 2000 V-Motoren
3. Vorschaltwiderstände dazu für die Spannungsspule.
4. Spannungsspulen-Umschalter für den Leistungsmesser.
5. Strommesser für die 2000 V-Motoren.
6. Stromtransformator dazu.
7. Spannungsmesser für die 2000 V-Motoren.
8. Vorschaltwiderstände dazu.
9. Spannungsausschalter für die Instrumente.
10. Schreibender Leistungsmesser für die 500 V-Motoren.
11. Kurzschließer dazu für die Stromspule.
12. Spannungsausschalter für den schreibenden Leistungsmesser.
13. Leistungsumschalter für die übrigen Meßinstrumente der 500 V-Seite.
14. Leistungsmesser für die 500 V-Motoren.
15. Vorschaltwiderstand dazu für die Spannungsspule.
16. Strommesser für die 500 V-Motoren.
17. Stromtransformator dazu.
18. Spannungsmesser für die 500 V-Motoren.
19. Spannungsausschalter für die Instrumente der 500 V-Seite.

Pumpen, verfolgt werden sollen. In solchen Fällen wird man schreibende Instrumente, namentlich schreibende Leistungszeiger mit einschalten, für die dann aber der Einfachheit halber die Schaltung für symmetrische Belastung, d. i. die in **71** angeführte Methode unter Benutzung einer Hauptstromstärke $\tilde{J}_3$ (vgl. Fig. 192) aber zweier Spannungen $\tilde{E}_{3,2}$ und $\tilde{E}_{3,1}$, vorgezogen wird,

wobei man sich mit etwas geringerer absoluter Zuverlässigkeit begnügt. Ein solcher schreibender Leistungszeiger in sog. Nullpunktsschaltung (vgl. hierzu in **71**) ist auch im Schema der Fig. 192 angenommen, jedoch so daß er mittels Kurzschließer nach Belieben ein- und ausgeschaltet werden kann. Der mit einem solchen Leistungsschreiber aufgenommene Leistungsverbrauch von Pumpenmotoren ist nach Messungen der S. S.-Werke auf Zeche Dahlbusch (siehe Nachrichten Heft 7 Dez. 1905) in Fig. 193 wiedergegeben.

Nach dem Schema der Fig. 192 könnte die Meßanordnung sehr einfach erscheinen. Hat man aber einen solchen Meßtisch herzurichten und hierbei, wie das praktisch häufig vorkommt, für zwei verschiedene Betriebsspannungen der zu untersuchenden Motoren, etwa $\tilde{E}_{1,2} = 2000$ Volt und $\tilde{E}_{1,2} = 500$ Volt wie auf Zeche Dahlbusch, Fürsorge zu treffen, so gelangt man bereits zu Meßanordnungen, die größerer Übersicht in der Anordnung und Umsicht in der Leitungsführung bedürfen, um unangenehme Zwischenfälle zu vermeiden und hinreichend brauchbare Meßergebnisse zu erzielen. Die von den S. S.-Werken benutzte Anordnung des Meßtisches möge daher als Musterbeispiel eines solchen vorübergehenden Aufbaues in Fig. 194 wiedergegeben sein.

100. Betriebskurven. Wirkungsgradermittelungen.

Die Ermittelung der Betriebskurven von Drehstrommotoren bei bestimmten, nicht rasch wechselnden Belastungsverhältnissen wird eine Unterscheidung in Motoren mit konstanter Tourenzahl — abgesehen von dem geringen Prozentsatz der Schlüpfung — und in solche mit regulierbarer Tourenzahl — meist unter Änderung des Widerstandes im Läuferkreis — nahe legen. Von diesen sollen zuerst die häufiger vorkommenden und normal mit kurzgeschlossenem Läufer arbeitenden Motoren, hierauf die Motoren mit regulierbarer Tourenzahl betrachtet werden.

Die Wirkungsgradermittelung zu $\eta = \frac{(PS)_n}{1{\cdot}36 \cdot \mathring{W}}$, d. i. der nutzbaren an der Motorwelle abgegebenen Pferdestärken $(PS)_n$ oder Kilowatt $\frac{(PS)_n}{1{\cdot}36}$ zu der aufgenommenen Drehstromleistung $\mathring{W}$ in KW bietet gegenüber dem früher bei anderen Maschinen angegebenen Vorgehen (**86** ff.) bei der Messung der mechanischen Größen gar nichts Neues, bei der Messung der elekrischen Größen nur die Beachtung der in **70** angeführten Punkte bei Feststellung der Drehstromleistung $\mathring{W}$. Dieses Verfahren wird aber — abgesehen von den in **86** angeführten Gesichtspunkten — aus rein praktischen Schwierigkeiten, d. i. der Wegbremsung größerer Leistungen meist nur bei Motoren kleinerer Leistung durchführbar sein, bei größeren Motoren aber gewöhnlich nicht, namentlich wenn sie bereits ihre endgültige Aufstellung gefunden haben. In diesen Fällen wird man fast durchgehends die nach den Normalien zulässige mittelbare Wirkungssgradbestimmung bevorzugen, indem man alle Einzelverluste W_v für sich bestimmt und die Wirkungsgrad k u r v e zu $\eta = \frac{W_n}{W_n + W_v}$ erhält (siehe hierzu auch in **88**).

101. Bestimmung der Einzelverluste.

Bei allen Drehfeldmotoren oder überhaupt Asynchronmotoren ohne Kommutator lassen die Verluste W_v neben der allgemein gültigen Unterteilung in Kupferverluste, Eisenverluste und Reibungsverluste eine weitere Unterteilung der Kupferverluste in Stromwärmeverluste in der Ständer- und in der Läuferwickelung zu, die getrennt bestimmt werden, während die Eisenverluste als Hysterese- und Wirbelstromverluste gemeinschaftlich ermittelt werden, ähnlich wie die aus Lager- und Luftreibung zusammen-

gesetzten Reibungsverluste. Das Verfahren zu der Bestimmung der Einzelverluste pflegt folgendes zu sein:

Die Verluste in der Ständerwickelung $\mathring{W}_s = 3\,\tilde{J}_1{}^2 \cdot R_s$ werden abhängig von der Betriebsstromstärke $\tilde{J}_1$ in einer Leitung aufgetragen, indem man R_s im betriebswarmen Zustand ermittelt und mit Hilfe der obigen Formel das $\mathring{W}_s$, wobei man als R_s den Widerstand einer Phase oder $\frac{1}{2}\ R_{1,2}$ bei Sternschaltung und $\frac{3}{2}\ R_{1,2}$ bei Dreieckschaltung einsetzt, wenn $R_{1,2}$ der gemessene Mittelwert zwischen je 2 Klemmen ist. Geschieht diese Bestimmung mit verschiedenen Stromstärken und ergibt der Mittelwert für R_s z. B. 0·483 Ω, so werden die Statorverluste abhängig von der Statorstromstärke durch die Kurve der Fig. 195 dargestellt. Allerdings ist nicht zu übersehen, daß bei nicht guter Unterteilung des Statorkupfers auch hier eine Vergrößerung von $\tilde{R}_s$ gegenüber $\overline{R}_s$ infolge von Oberflächenwirkung und Wirbelstrombildung eintreten kann, wenn sie auch gewöhnlich sehr viel kleiner ausfallen wird als bei Generatoren (vgl. **81**), weil die Kupferquerschnitte hier

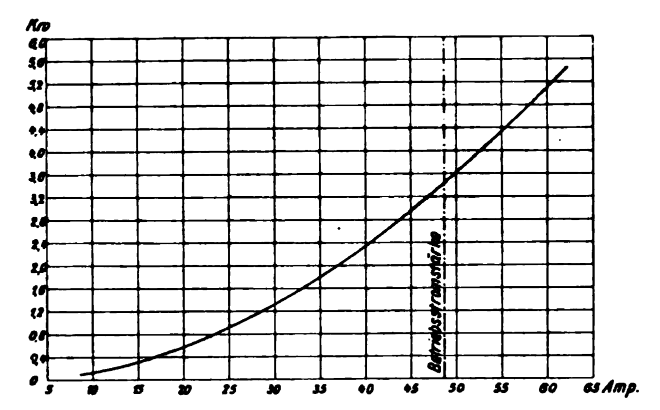


Fig. 195. Leistungsverlust im Statorkupfer.

kleiner zu sein pflegen und die ausgeprägten Polformen des Läufers fehlen; doch wird die Vergrößerung etwa die bei Transformatoren auftretenden Werte (siehe in **107**) erreichen können.

Die Verluste im Läuferkupfer lassen die Bestimmung durch die vorstehende Methode aus verschiedenen Gründen nicht zu. Da sie aber nach Theorie und Erfahrung direkt proportional mit der Schlüpfung σ in $^0/_0$ zunehmen (siehe Bd. V u. IX), so kann man aus dieser und der zugeführten Primärleistung $\mathring{W}_1$ unter Abzug von $\mathring{W}_s$ den Verlust $\mathring{W}_\varrho$ im Läuferkupfer ausreichend genau zu $\mathring{W}_l = (\mathring{W}_1 - \mathring{W}_s) \cdot \frac{\sigma}{100}$ berechnen.

Beträgt z. B. $\mathring{W}_1 = 121{\cdot}07$ KW, ferner $\mathring{W}_s = 3{\cdot}434$ KW und der mit Dietze-Anleger und Gleichstromvoltmeter (siehe **48**) gemessene Mittelwert von $\sigma = 2{\cdot}1\ ^0/_0$, so folgt hieraus

$$\mathring{W}_l = (121{\cdot}07 - 3{\cdot}434) \cdot \frac{2{\cdot}1}{100} = 2{\cdot}470 \text{ KW}.$$

Den Stromwärmeverlusten gegenüber kann man alle übrigen Verluste, wie die Eisenverluste und die Reibungsverluste, welche praktisch einerseits nur von der Spannung, andererseits nur von der Tourenzahl abhängen, als

Leerlaufverluste zusammenfassen und hinreichend genau durch Messung der primären Leerlaufwatt $\dot{W}_1{}^0$ ermitteln. Führt man diese Messung für eine Reihe von Betriebsspannungen $\tilde{E}_k$ an den Motorklemmen durch und findet z. B. für

$\tilde{E}_k$ in Volt =	2163·6	1967·6	1528·8	1280·1	941·1	659·0
$\dot{W}_1{}^0$ in KW =	7·8	6·7	5.0	4·4	3·5	3·0

so liefert die Auftragung dieser Werte abhängig von $\tilde{E}_k$ die in Fig. 196 dargestellte Kurve. Wird diese sinngemäß gegen $\tilde{E}_k = 0$ verlängert, so findet man durch Extrapolation die Luft- und Lagerreibungsverluste für sich, da diese mit der Tourenzahl bei der äußerst kleinen Schlüpfung praktisch von $\tilde{E}_k$ unabhängig sind. Die kleinen Kupferverluste $\dot{W}_s{}^0$ (im Stator) von $\dot{W}_1{}^0$ abzuziehen, wird man auch unterlassen, da sie durch kleine zusätzliche Verluste beim belasteten Motor — hier namentlich bei der Lagerreibung — mehr oder weniger aufgewogen werden.

Würde bei dem schon wiederholt angeführten Pumpenmotor die Betriebsspannung bei der Messung 1991·2 Volt betragen haben, so ergäbe dies nach

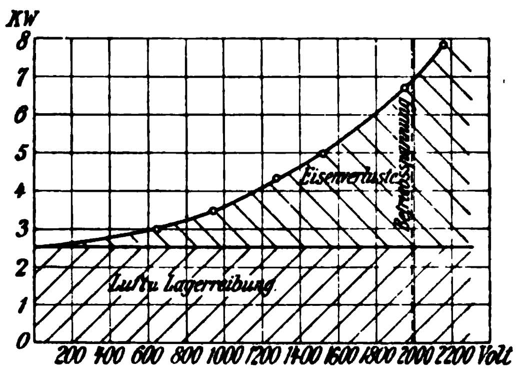


Fig. 196.

Fig. 196 die Eisenverluste zu 4·330 KW und die mechanischen Reibungsverluste zu 2·550 KW; also zusammen mit den oben angeführten Kupferverlusten 12·784 KW, d. h. die vom Motor abgegebene Nutzleistung 108·28 KW, oder der Motorwirkungsgrad $\eta = \frac{108{\cdot}286}{121{\cdot}07} = 89{\cdot}44\ \%$.

Die vorstehend angeführte Ermittelung der Einzelverluste mit der in Fig. 192 angeführten Meßschaltung liefert für verschieden große Belastungen die in Tabelle IV unter 2 bis 6 angegebenen Werte der unmittelbaren Beobachtung. Aus diesen wurden die Werte der folgenden Horizontalreihen abgeleitet. Die Zahlenwerte der Tabelle IV beziehen sich auf den Antriebsmotor der Sieberei auf Schacht III (vgl. **99**, sowie a. a. O. Seite 178). Werden diese Werte zur graphischen Darstellung gebracht, so liefern sie die Betriebskurven der Fig. 197, wobei aber für $\dot{W}_s$ und $\dot{W}_l$ der größeren Deutlichkeit halber ein eigener Leistungsmaßstab im Verhältnis von 10 : 1 gewählt wurde.

103. **Leistungsbedarf von Arbeitsmaschinen.** Wie dieses Meßverfahren unschwer erkennen läßt, stellt der Elektromotor mit bekannter oder durch eigene Messung ermittelter Wirkungsgradkurve nun seinerseits ein wertvolles, bequemes Meßmittel vor zur Ermittelung des Leistungsbedarfs aller von ihm angetriebener Arbeitsmaschinen und weiterhin zur Feststellung ihres Wirkungsgrades, wenn ihre Leistung in absoluten

Tabelle IV.

Nr.	6 poliger Motor; 30 PS; 2000 V; 8,5 Amp.; $n = 980$; 2,0 % Schlüpfung							
1.	Art der Belastung	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*
2.	Zugeführte Leistung KW $\mathring{W}_1$	5,496	5,684	11,357	23,232	12,120	15,046	26,020
3.	Stromstärke Amp. $\tilde{J}_1$	3,0	3,51	4,76	8,25	5,217	5,78	9,03
4.	Spannung Volt $\tilde{E}_e$	2025,0	2020,1	2014,0	2000,0	2003,5	2063,8	2007,0
5.	Statorwiderstand pro Phase Ohm R_1	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
6.	Schlüfung des Rotors in % σ	0,117	0,28	0,47	0,84	0,46	0,49	0,98
7.	Leistungsfaktor cos φ $\varphi = \sphericalangle(\tilde{J}_1, \tilde{E}_1)$	0,523	0,463	0,684	0,814	0,670	0,729	0,830
8.	Verlust im Ständerkupfer KW	—	0,103	0,190	0,572	0,229	0,281	0,685
9.	Verlust im Läuferkupfer KW	—	0,015	0,052	0,190	0,055	0,072	0,225
10.	Verlust durch Eisen-, Lager- und Luftreibung KW	5,496	5,496	5,496	5,496	5,496	5,496	5,496
11.	Summe der Verluste KW $\mathring{W}_v$	—	5,614	5,738	6,258	5,730	5,849	6,406
12.	Vom Motor abgegebene KW $\mathring{W}_n$	—	—	5,619	16,974	6,340	9,197	19,614
13.	Nutzleistung umgerechnet in PS $= 1{\cdot}36\ \mathring{W}_n$	—	—	7,63	23,06	8,61	12,50	26,60
14.	Wirkungsgrad in % η	—	—	49,48	73,06	52,31	61,13	75,38
15.	Belastung in %	—	—	25,43	76,86	28,70	41,67	88,90

Einheiten meßbar oder angebbar ist, wie z. B. bei Pumpen in Form von Wasserpferden, oder bei Ventilatoren in Form von Fördermenge in m³ und Depression in mm. Aber auch wo dies nicht der Fall ist, ist die Messung des wahren Leistungsbedarfs der Arbeitsmaschinen in einem bestimmten normalen Betriebszustand von großem technischen Wert und in vielen Fällen ist diese überhaupt erst durch die Verwendung von Elektromotoren zum Antrieb praktisch durchführbar geworden.

Hierbei ist zu bemerken, daß die Belastung der meisten Arbeitsmaschinen bei gleichmäßiger Beschickung eine auffallend gleichförmige ist, ja vielfach gleichförmiger als sie bei provisorischen Bremsvorrichtungen erzielbar ist, wie Verfasser bei Untersuchung eines 300 PS Drehstrommotors, der eine Cementfabrik antrieb, festzustellen Gelegenheit hatte. In solchen Fällen können bei größeren Motoren mit gemeinsamen Antrieb die einzelnen Arbeitsmaschinen geradezu als

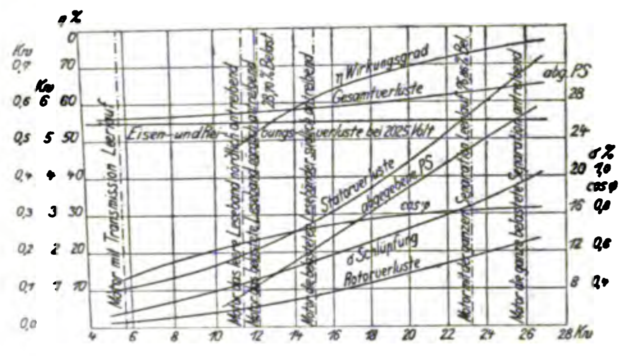


Fig. 197.

Belastungselemente zur Untersuchung des Motors dienen, wie es im vorliegenden Fall durch die Not bedingt wurde. Nachdem der Motor durch Bremsungen bis etwa 180 PS untersucht und seine Wirkungsgradkurve bis dahin festgestellt war, versagte die Bremse unter wiederholtem Festfressen. Um die Untersuchung weiter vornehmen zu können, wurden innerhalb des benutzbaren Bereichs (180 PS) die verschiedenen Aggregate des Mühlenbetriebes, wie Kollergänge, Grobmahlstühle, Feinmahlstühle und Kugelmühlen bei normaler Beschickung in verschiedenen Variationen in ihrem Bedarf gemessen und durch Beobachtungen von längerer Dauer und bei wiederholten Kontrollen durch An- und Abschalten die Konstanz und der Betrag ihres mittleren Bedarfs festgestellt, so daß sie jetzt als Belastungselemente weiterhin benutzt und der Motor bis gegen die Vollbelastung hin untersucht werden konnte.

103. Motor mit Regulierwiderstand.

In gewissen Fällen der Praxis wird eine Regulierung der Tourenzahl für Dauerbetrieb in weiteren Grenzen verlangt, was bei Drehstrommotoren im allgemeinen nur durch einen dauernd eingeschalteten Regulierwiderstand im Läuferkreis mit entsprechender Kontaktzahl und Abstufung ausführbar ist. Um diese Verhältnisse, sowie die hier teilweise etwas abweichende Ermittelung der gewünschten Werte aus den Beobachtungszahlen aufzuzeigen, sei ein Teil des Beobachtungsmaterials an einem Grubenventilator wiedergegeben, der von einem direkt gekuppelten Drehstrommotor angetrieben, den Schacht III der Zeche Dahlbusch mit Frischluft versieht (vgl. hierzu in 89). Ausführlicheres siehe a. a. O. Seite 170 ff. Die Messungen erfolgten nach dem Schema der Fig. 192 und für alle 10 Kontaktstellungen des Regulierwider-

standes, doch wurden in Tabelle V nur die Werte für Stellung I, IV, VI, VIII und X zusammengestellt, aber sie erfahren durch die graphische Darstellung der Betriebskurven in Fig. 198 bis 203 ihre Ergänzung.

Tabelle V.

Nr.	Versuchsgrößen					
1.	Stufe des Regulierwiderstandes	I	IV	VI	VIII	X
2.	Zugeführte Stromstärke in Amp.	84,6	97,6	108,6	120,3	139,0
3.	Spannung in Volt	2050	2043	2049	2047	2052
4.	Zugeführte Leistung in KW	226,4	276,8	318,8	360,0	420,8
5.	Umdrehungen pro Minute	175	197	210	225	243
6.	Gesamte Schlüpfung σ in %	30,0	21,2	16,0	10,0	2,8
7.	cos φ	0,75	0,80	0,83	0,85	0,85
8.	Schlüpfung des Rotors, sofern der Regu-widerstand nicht vorhanden wäre, in %	1,5	1,8	2,1	2,4	2,8
9.	Durch Regulierwiderstand bedingte Schlüpfung in %	28,5	19,4	13,9	7,6	0,0
10.	Leistungsverlust im Regulierwiderstand KW	63,5	52,7	43,5	26,8	0,0
11.	Leistungsverlust im Statorkupfer KW	3,5	4,6	5,7	7,0	9,4
12.	Leistungsverlust im Rotorkupfer KW	3,3	5,0	6,6	8,5	11,5
13.	Leistungsverlust der Lager- und Luftreibung KW	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
14.	Leistungsverlust im Eisen KW	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6
15.	Summe der Verluste KW	83,0	75,0	68,5	55,0	33,6
16.	Vom Motor abgegebene Leistung KW	143,4	201,8	250,3	305,0	387,2
17.	Motor-Wirkungsgrad in %	63,3	72,8	78,5	84,7	92,0
18.	Theoretische Depression in mm	162	210	236	270	314
19.	Gemessene Depression in mm	139	178	204	230	266
20.	Äquivalente Grubenweite in qm	3,02	—	2,85	—	2,92
21.	Wettermenge in cbm pro Minute	5646,5	6048,0	6427,2	6792,0	7409,2
22.	Barometerstand außen in cm	76,45	—	76,45	—	76,45
23.	Barometerstand im Meßraum in cm	75,44	—	75,04	—	74,55
24.	Temperatur außen °C	9,0	—	9,0	—	8,5
25.	Temperatur im Meßraum °C	17,0	—	17,0	—	17,0
26.	Meßquerschnitt in qm	4,91	—	4,91	—	4,91
27.	Wettergeschwindigkeit in m pro Sek.	19,2	—	21,7	—	25,1
28.	Gewicht von 1 cbm Luft in kg	1,21	—	1,20	—	1,19
29.	Arbeitsleistung des Ventilators in PS	174,4	239,5	290,0	346,0	438,0
30.	Manometer-Wirkungsgrad in %	85,0	—	86,0	—	84,8
31.	Ventilator-Wirkungsgrad in %	89,4	87,4	85,3	83,4	83,2
32.	Gesamt-Wirkungsgrad in %	56,6	63,7	67,0	70,6	76,5

Zu der Tabelle ist zu bemerken, daß die Horizontalreihen 2 bis 6 wieder die unmittelbar beobachteten Größen am Elektromotor darstellen, 7 bis 17 seine daraus abgeleiteten Größen, während 18 bis 31 die Ventilatorgrößen und 32 den Gesamtwirkungsgrad wiedergeben. Von den berechneten Elektromotorgrößen tritt hier (gegenüber den Motoren ohne Regulierwiderstand) hinzu die Zerlegung der gemessenen Gesamtschlüpfung unter σ in die Teilschlüpfungen 8 und 9, wobei die zur Berechnung von $\dot{W}_L$ erforderliche ideelle Läuferschlüpfung 8 nach Fig. 198 durch Verbinden des für Stellung X (Widerstand kurzgeschlossen) gefundenen Wertes $\sigma = 2{\cdot}8$ % mit dem Anfangs-

punkt der Abzissenwerte erhalten wird. Nach der Formel $\dot{W}_l = (\dot{W}_1 - \dot{W}_l)\frac{\sigma}{100}$ in **101** läßt sich hieraus sowohl der Läuferverlust der Reihe 12, als auch der Stromwärmeverlust im Regulierwiderstand der Reihe 10 ableiten, deren Verhältnis am besten durch das Diagramm der Fig. 199 zur Darstellung gelangt.

Den Einfluß des Regulierwiderstandes auf Tourenzahl n und Ausnutzung von $\dot{W}_1$ im Motor zeigt Fig. 200, während das Verhältnis zu den übrigen

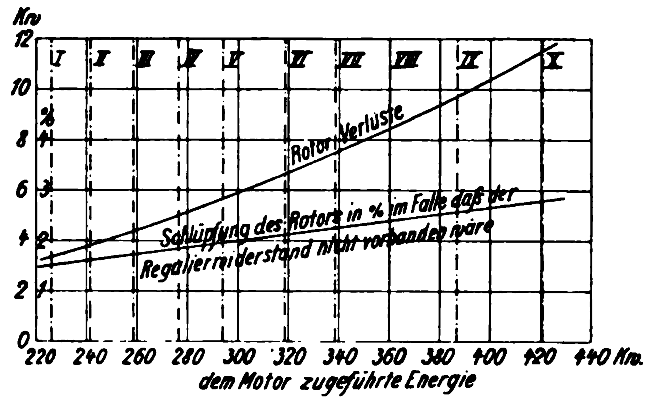


Fig. 198.

Motorverlusten der Reihen 11 bis 14, welche wie in 88 abgeleitet sind, durch Fig. 201 zum Ausdruck kommt. Die wichtigeren Ventilatorgrößen zusammen mit den veränderlichen Größen des Elektromotors sind in Fig. 202

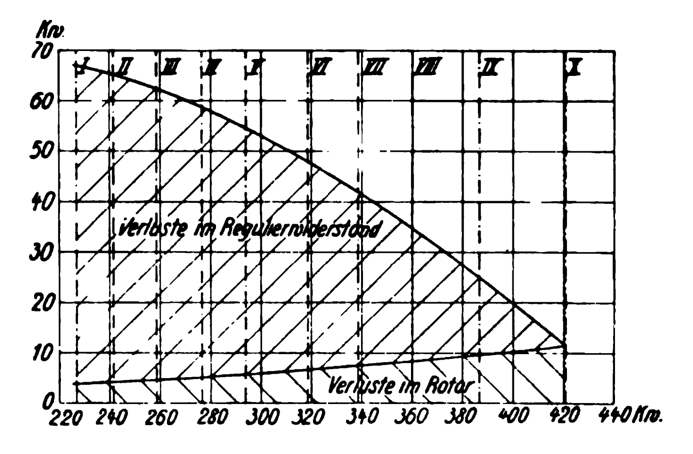


Fig. 199.

dargestellt und die Wirkungsgradkurven von Motor η_m, Ventilator η_v und Gesamtaggregat η_g endlich in Fig. 203 wiedergegeben.

Weiteres über Betriebskurven von Drehstrommotoren siehe in Bd. IX, 1.

104. Streuungsfaktorbestimmungen. Die experimentelle Ermittelung der Streuungsverhältnisse des Motors, oder auch der grundlegenden Werte für das Kreisdiagramm (Näheres siehe in Bd. V und Bd. IX, 1) kann entweder durch Spannungsmessungen bei geöffneter Läuferwickelung, oder durch Stromstärkemessungen bei kurzgeschlossener Läuferwickelung erfolgen. In beiden Fällen muß aber der

Läufer stehen, der Motor also in seinem Verhalten als ruhender Transformator untersucht werden, wie dies ausführlicher im folgenden Abschnitt angegeben ist (vgl. 105 ff.).

Als komplizierend kommen beim Motor aber folgende zwei Punkte hinzu, welche besondere Beachtung verdienen, um erhebliche Fehler zu vermeiden:

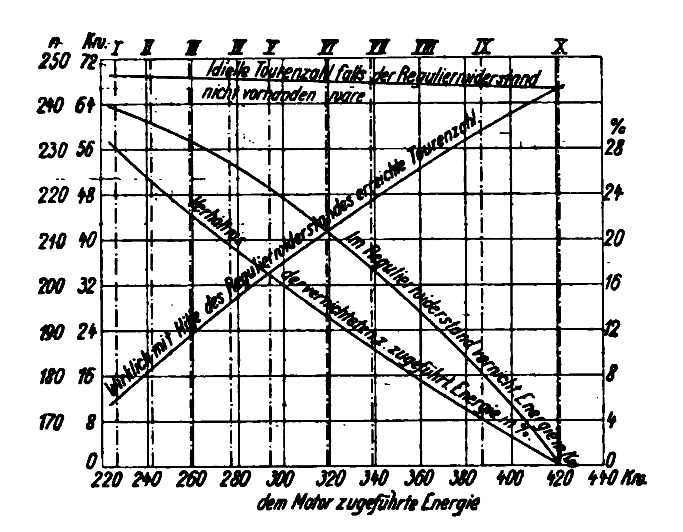


Fig. 200.

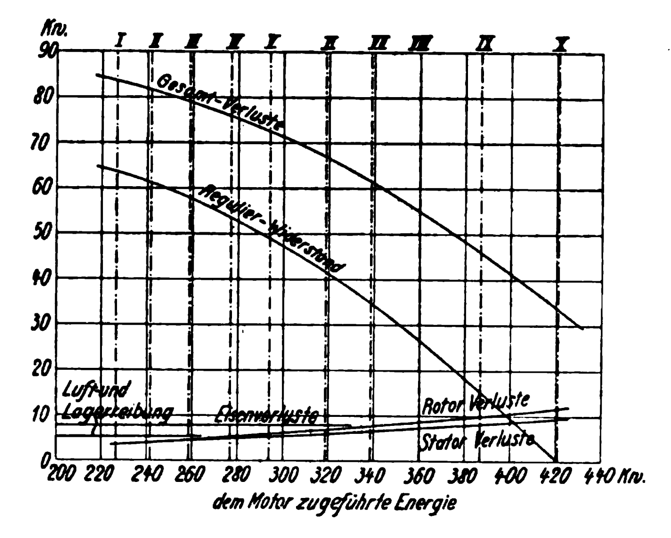


Fig. 201.

Der HOPKINSONsche Streuungsfaktor (vgl. Bd. V, Seite 294) ν_1 des Ständers und ν_2 des Läufers ist durch die Beziehung gegeben:

$$\nu_1 = \frac{\tilde{E}_1}{\tilde{E}_2} \cdot \frac{k_2 \cdot S_2}{k_1 \cdot S_1} \quad \text{bzw.} \quad \nu_2 = \frac{\tilde{E}_2}{\tilde{E}_1} \cdot \frac{k_1 \cdot S_1}{k_2 \cdot S_2}.$$

Neben dem Verhältnis der Spannungen kommen also nicht nur die einfachen Zahlen S_1 und S_2 der auf je eine Phase bei der Induktion beteiligten

Drähte in Frage, sondern, da es sich um verteilte Wickelungen handelt, auch das Verhältnis der Wickelungsfaktoren k_1 und k_2 (für Ständerwickelung und Läuferwickelung), die als Nutenfaktoren oder auch KAPPsche Faktoren

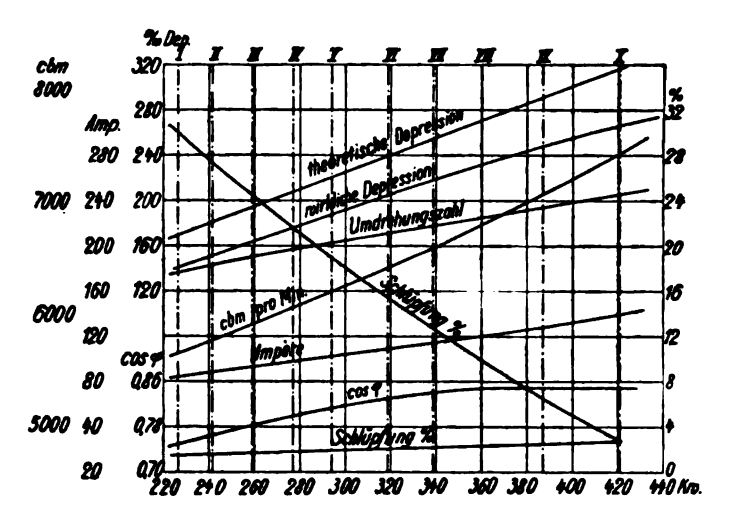


Fig. 202.

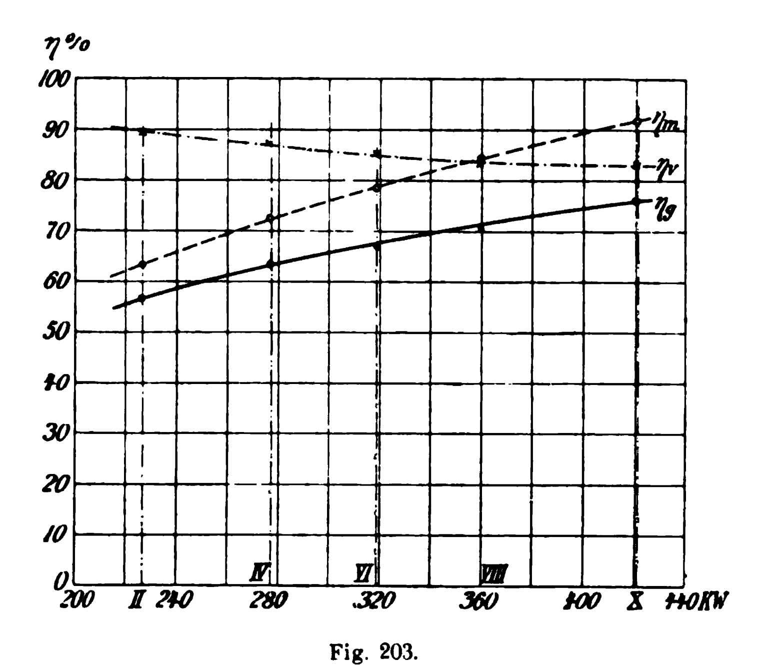


Fig. 203.

bezeichnet zu werden pflegen (siehe hierzu Bd. V Seite 76 ff.). Allerdings wird das Verhältnis $\frac{k_1}{k_2}$ in vielen Fällen, namentlich bei Phasenwickelung im Läufer, so wenig von der Einheit abweichen, daß der hierdurch begangene Fehler gering ausfällt. Weiterhin ist zu beachten, daß bei Motoren gegenüber den Transformatoren infolge des Vorhandenseins des Luftspaltes der Leerlaufstrom $\tilde{J}_1$ einen viel höheren Prozentsatz des Vollbelastungsstromes aus-

macht, weshalb der Unterschied zwischen der einzusetzenden Umsetzungsspannung oder GEMK $\tilde{E}_1$ und der meßbaren Klemmenspannung $\tilde{E}'_1$ (vgl. Fig. 204) merklich ist und mit Hilfe der Beziehung

$$\tilde{E}_1 = \sqrt{(\tilde{E}_1')^2 + (\tilde{J}_1 R_1)^2 - 2\,\tilde{E}_1' \cdot \tilde{J}_1 \cdot R_1 \cdot \cos\varphi_1}$$

berechnet werden muß, was außer der Ermittelung von $\tilde{J}_1$ und des betriebswarmen Widerstandes R_1 der Ständerwickelung noch die Ermittelung von $\cos\varphi_1$ durch die Messung der primär zugeführten Watt nach der Schaltung der Fig. 204 erfordert. Um eine größere Zuverlässigkeit zu erreichen, wird man gut tun, die Voltmeter für $\tilde{E}_1'$ und $\tilde{E}_2$ an der gebrauchten Skalenstelle genau auf etwaige gegenseitige Abweichungen zu prüfen, oder auch dasselbe Voltmeter zur Messung beider Größen zu verwenden.

Für das Kreisdiagramm ist einmal der Kurzschlußstrom $\tilde{J}_2$ für einen gleichfalls gemessenen Bruchteil $\tilde{E}_1'$ der zugeführten Betriebsspannung in Verbindung mit dem Primärstrom $\tilde{J}_1$ und dem Leistungsfaktor $\cos\varphi_1$ von Interesse, um durch Umrechnung auf den vollen Kurzschlußstrom schließen zu können, ein zweites Mal der reine Magnetisierungsstrom des Motors. Für die erste Bestimmung wird das Voltmeter zur Messung von $\tilde{E}_2$ durch ein passendes Amperemeter ($\tilde{J}_2$) von möglichst kleinem Widerstand ersetzt, wie in Fig. 204 strichliert angedeutet ist; anstelle des Amperemeters könnte auch hier ein DIETZE-Anleger oder sonstiger geeigneter Stromtransformator treten. Für die zweite Bestimmung müßte der leerlaufende, also sekundär offene Motor durch einen passenden kleinen Hilfsmotor langsam in seiner Tourenzahl gesteigert werden, bis alle Leerlaufverluste durch diesen gedeckt werden und der zu untersuchende Motor die völlig synchrone Tourenzahl erreicht und schließlich dieselbe auch etwas zu überschreiten vermag. Beobachtet man während dieser langsamen Tourenzahländerung das aperiodische Amperemeter zur Messung von $\tilde{J}_1$, so wird bei konstanter Spannung $\tilde{E}_1'$ der Wert von $\tilde{J}_1$ abnehmen, ein Minimum erreichen und alsdann wieder ansteigen. Das Minimum von $\tilde{J}_1$ entspricht dem genauen Synchronismus und liefert überdies den gesuchten wahren Magnetisierungsstrom.

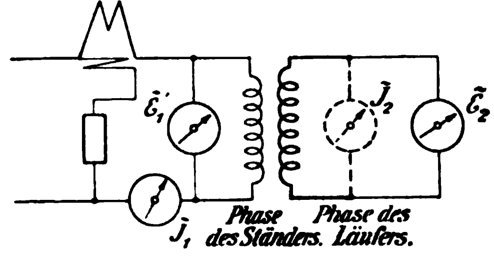


Fig. 204

Alles weitere über Verwertung dieser Größen in der Theorie der Motoren siehe in Bd. V und IX.

F. Transformatoren.

105. Allgemeines. Dauerprobe. Isolationsprüfung.

Neben den Dauerproben mit Übertemperaturbestimmungen und Isolationsprüfungen der Wickelungen (gegen das Gestell und gegeneinander), wie sie die Maschinennormalien (siehe 76) vorschreiben, werden bei diesen Umsetzungsapparaten die Wirkungsgradkurven, namentlich auch bei kleineren Belastungen, und die Spannungsänderung abhängig von $\tilde{J}_{II}$ und $\cos\varphi_{II}$ die technisch wichtigsten Charakteristiken ausmachen, wobei dem Spannungs-

abfall praktisch noch die größere Bedeutung zukommt und dieser daher bei der Messung besondere Berücksichtigung verdient.

Was zunächst die Dauerprobe anlangt, so wird man auch hier, wo angängig, die Zurückarbeitungsmethode (Gegenschaltung) bevorzugen, um die Vergeudung der vollen Leistung und die Beschaffung eines Belastungswiderstandes zu vermeiden, oder man wird sich mit einer künstlichen Belastung, d. i. Heizung der Wickelungen durch Gleichstrom begnügen, während

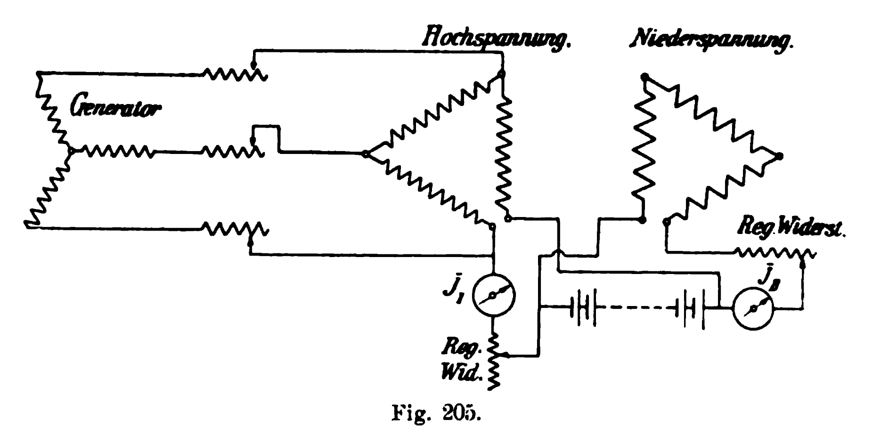


Fig. 205.

man nur die Magnetisierungsarbeit durch Wechselstrom besorgt. Da die Zurückarbeitungsmethode auch für die Wirkungsgradbestimmung dient, so sei wegen der Schaltung auf diese verwiesen (**106**). Die künstliche Belastung mit Gleichstrom setzt, ähnlich wie bei Erzeugern (vgl. **90**), die Zuführung des Gleichstroms an neutralen Punkten (hinsichtlich der Wechsel-

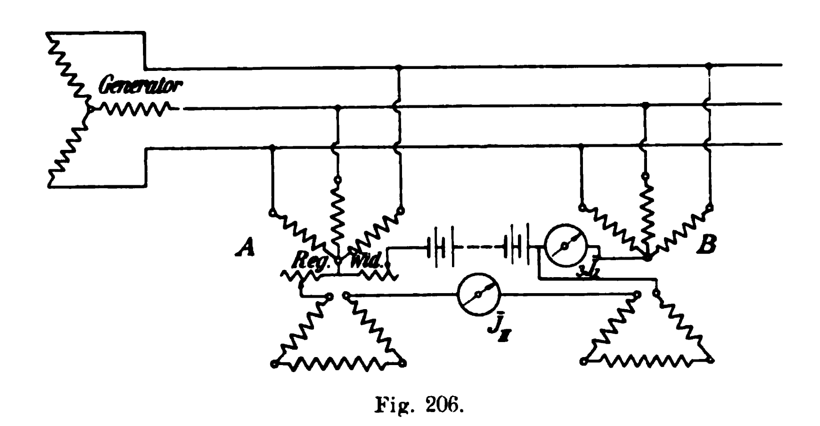


Fig. 206.

spannung) voraus; sie findet daher überwiegend bei Drehstromtransformatoren Anwendung. Fig. 205 deutet die Anordnung für einen einzelnen Transformator, Fig. 206 diejenige bei Vorhandensein zweier gleicher Transformatoren A und B an. (Weiteres siehe GOLDSCHMIDT ETZ 1901, 682.) Beide stellen Wellenstromschaltungen dar, bei welchen die Regulierung der Wechsel- und Gleichstromkomponente in den Transformatorwickelungen unabhängig voneinander möglich ist (I, 2 in **152**).

Die Messung der Übertemperatur T besitzt bei Dauerproben die größte

Wichtigkeit, da von T die maximale Leistungsfähigkeit des Transformators bedingt wird. Vergleichende Messungen mit verpacktem Thermometer an der zugänglichen Spulenoberfläche und mit Ermittelung der Widerstandszunahme der Spule haben ergeben, daß diese Temperaturen um etwa 30 % höher liegen als die Thermometerangaben, sonach schreiben die Normalien mit Recht vor, daß für die Ermittelung der Spulentemperatur wegen

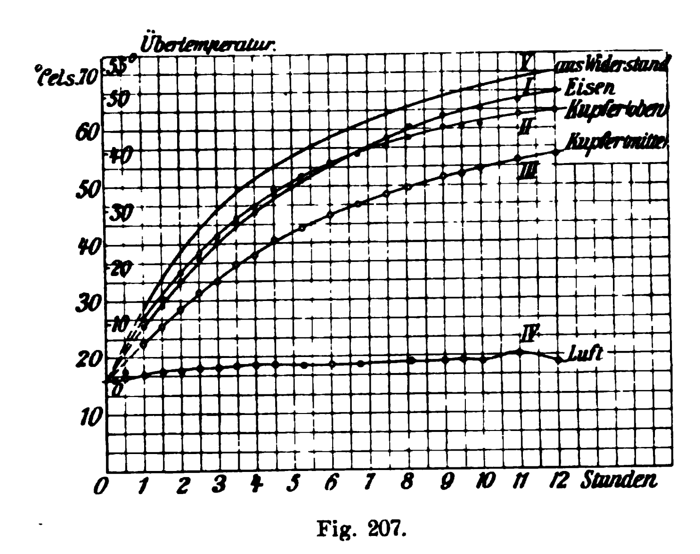


Fig. 207.

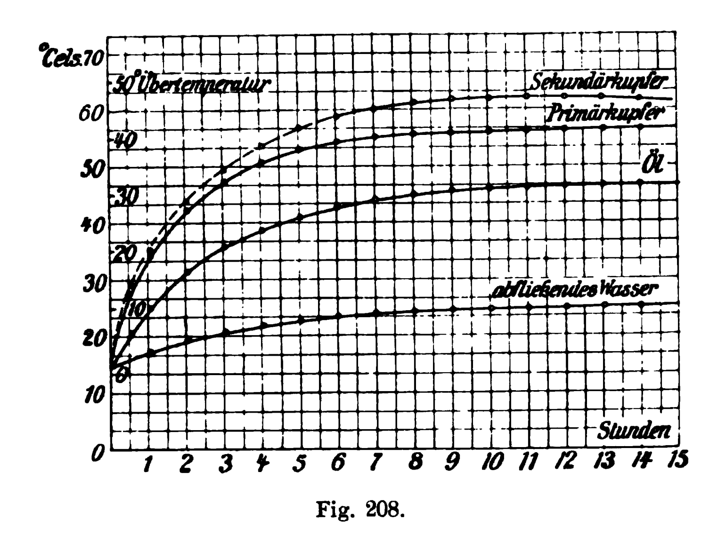


Fig. 208.

ihres naturgemäß starken Temperaturgefälles von innen nach außen die Widerstandszunahme maßgebend ist. Da der stationäre Wärmezustand bei den Transformatoren erst nach einer größeren Reihe von Stunden Vollbelastung erreicht wird, jedenfalls kaum früher als nach 10 Stunden, so müssen die Temperaturen etwa alle Stunden beobachtet werden, bis keine weitere erhebliche Steigerung bemerkbar ist.

Die Temperaturkurven liefern in Übereinstimmung mit der Theorie angenähert Exponentialkurven, wie die Fig. 207 und 208 erkennen lassen, von

denen 207 sich auf einen Drehstromtransformator von 20 KVA mit Scheibenwickelung und natürlicher Luftkühlung und 208 sich auf einen 500 KVA-Manteltransformator in Öl mit Wasserkühlung bezieht (beide nach E. ARNOLD, Wechselstromtechnik Bd. II, Seite 171 und 172).

Die Prüfung der Isolation der Transformatorwickelungen auf Durchschlagsfestigkeit mit den vorgeschriebenen Überspannungen findet, abgesehen von der Überprüfung der Einzelspulen auf Isolationsfehler bzw. Kurzschlußerscheinungen bei der Fabrikation in einem transformatorähnlichen Prüfapparat nach Fig. 209, am fertigen Transformator statt und zwar — zur möglichsten Vermeidung von Unfällen im Betrieb durch Übertritt der Hochspannung an das Gestell oder in die Niederspannungswickelung — zwischen den 3 Transformatorenelementen.

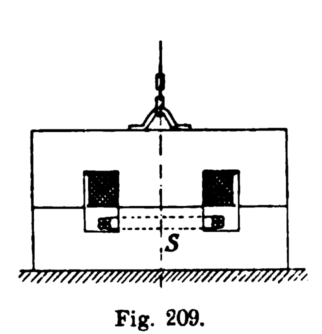


Fig. 209.

Die Erzeugung der erforderlichen Überspannung mit Hilfe von Meßtransformatoren oder durch Reihenschaltung mehrerer Hochspannungswickelungen bereitet bei den Hochspannungswerten zuweilen Schwierigkeiten, die vielfach durch die nicht ausreichenden Isolationsverhältnisse bedingt sind,

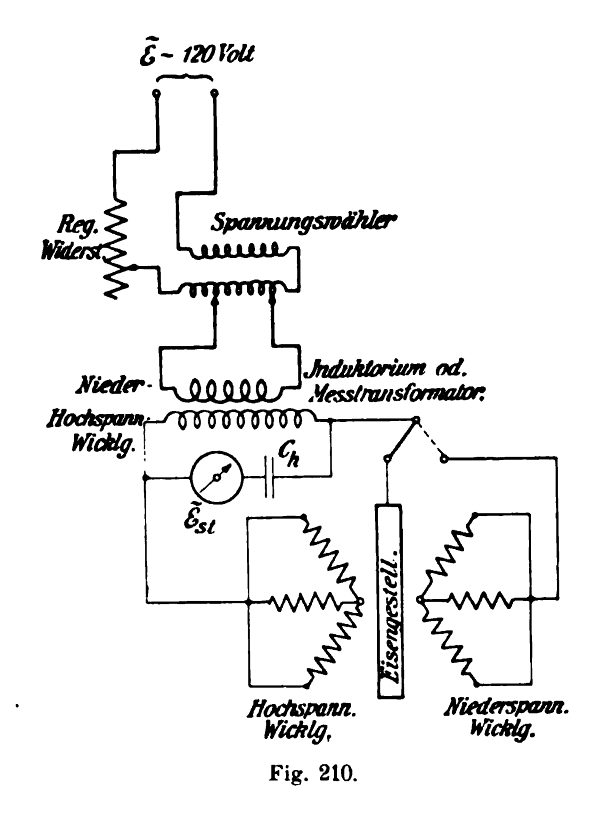


Fig. 210.

da bei der Konstruktion der Transformatoren die Reihenschaltung nicht in Rücksicht gezogen wurde. Man kann sich in diesen Fällen mit Vorteil eines RHUMKORFF-Induktors bedienen, da diese bei ihren großen Übersetzungsverhältnissen für sehr hohe Spannungen berechnet und bei Beschickung mit tech-

nischem Wechselstrom für solche Prüfungen bis zu Spannungen von 100000 Volt gut geeignet sind. Zur bequemen Variation der Spannungen schaltet man etwa den in 2 angeführten Spannungswähler (als Halbtransformator) zwischen die verfügbare technische Wechselspannung (100—250 Volt) und die Niederspannungswickelung des Induktoriums, falls erwünscht, noch unter Einfügung eines Regulierwiderstandes zur allmählichen Veränderung der Hochspannung. Die Messung der letzteren erfolgt für die vorliegenden Zwecke ausreichend mit einem elektrostatischen Voltmeter, nötigenfalls unter Vorschaltung einer kleinen Hilfskapazität C_h zur Erhöhung des Meßbereichs (siehe 4), oder mittels Spannungsteilung, wenn genauere Werte wünschenswert erscheinen. Die Enden der Hochspannungswickelungen werden am besten untereinander verbunden und an die eine Klemme des Induktoriums gelegt, während die andere einmal mit dem Eisengestell, ein zweites Mal mit der Niederspannungswickelung verbunden wird, wie es das Schema der Fig. 210 für die beschriebene Meßanordnung andeutet.

106. Wirkungsgrad. Zurückarbeitungsmethoden.

Die hohen Wirkungsgrade der gebräuchlichen technischen Transformatoren, welche sich etwa zwischen 95 und 98 % bewegen, lassen eine direkte Ermittelung von η durch Messung der aufgenommenen und der abgegebenen Leistung trotz der elektrischen Natur beider Messungen als so ungünstig erscheinen, daß man nur höchst selten diese Bestimmung durch Messung von W_I und W_{II} mittels Wattmeter vornehmen wird. Aus den früher (86) angeführten Gründen ist die Ermittelung der hier praktisch interessierenden Verlustprozente $\frac{W_I - W_{II}}{W_I}$ eben meßtechnisch, d. h. hinsichtlich der prozentualen Zuverlässigkeit, um so schlechter, je höher der Wert von $\eta = \frac{W_{II}}{W_I}$. Somit kommen für den Meßtechniker im wesentlichen nur die Zurückarbeitungsmethoden in Frage, wenn 2 oder mehr Transformatoren von gleicher Größe und Type vorliegen, und die Bestimmung aus den Einzelverlusten bei Untersuchung einzelner Transformatoren.

Die Wirkungsgradbestimmungen durch Gegenschaltung zweier gleicher Transformatoren oder die sog. Zurückarbeitungsmethoden beruhen auf dem gleichen Prinzip, wie es früher (87) bei den Maschinen angegeben wurde.

Bei der Untersuchung zweier gleicher Einphasentransformatoren A und B schaltet man also die Niederspannungswickelungen $a\,b$ und die Hochspannungswickelungen $a'\,b'$ (vgl. Fig. 211) gegeneinander, fügt in den Niederspannungskreis zur Erzeugung einer kleinen Zusatzspannung $\tilde{E}_z$ einen geeigneten regulierbaren Hilfstransformator T_z — hierfür kann bei nicht zu großen Leistungen auch der in 2 erwähnte Wechselspannungswähler Verwendung finden — und speist alle 3 Transformatoren in Parallelschaltung aus einem geeigneten Niederspannungsnetz $\tilde{E}_I$, wobei man die zugeführte Spannung $\tilde{E}_I$, zugeführte Stromstärke $\tilde{J}_v$ und die zugeführten Watt $\tilde{W}_v + \tilde{W}_z$ durch die Meßanordnung der Fig. 211 zur Messung bringt. Mißt man außerdem die Stromstärke $\tilde{J}_I$ im Niederspannungskreis und $\tilde{J}_{II}$ im Hochspannungskreis, ferner gegebenenfalls auch $\tilde{E}_{II}$ zur Feststellung des Übersetzungsverhältnisses der Transformatoren, so kann man mit Hilfe der 4 Schalter S_1 bis S_4 alle erforderlichen Größen zur Messung bringen.

Schließt man zunächst S_1 und S_4, öffnet S_3 und S_2, so mißt $\tilde{J}_I$ den Leerlaufstrom eines, $\tilde{J}_v$ den Leerlaufstrom beider Transformatoren von der Nieder-

spannungsseite aus, während das Wattmeter praktisch die Eisenverluste beider Transformatoren also

$$\tilde{W}_v = 2\ \tilde{W}_h$$

zur Messung bringt, sowie den Leistungsfaktor jedes unbelasteten Transformators zu $\cos\varphi = \tilde{W}_v : (\tilde{E}_I \cdot \tilde{J}_v)$. Hierbei wird vorausgesetzt, daß entweder $\tilde{E}_{II}$ keinen merklichen Stromverbrauch aufweist, oder vor der Ablesung der soeben genannten Instrumente abgeschaltet wird.

Schließt man jetzt S_2, so würde bei völliger Gleichheit von A und B sowohl $\tilde{J}_{II} = o$ werden, als auch an den Ablesungen der vorgenannten In-

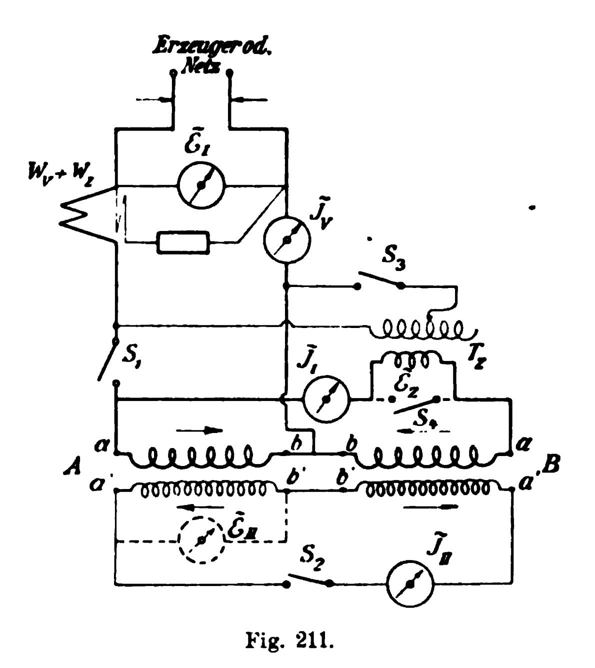


Fig. 211.

strumente nichts geändert werden (vgl. hierzu in **108**). Um jetzt die Transformatoren mit Strom zu belasten, d. h. $\tilde{J}_I$ und $\tilde{J}_{II}$ auf den Vollbelastungswert zu bringen, muß man S_4 öffnen und S_3 schließen. Dadurch werden dem kompensierten System von A und B in Gegenschaltung die zur Deckung von $2\,\tilde{J}_I^2 \cdot \tilde{R}_I + 2\,\tilde{J}_{II}^2 \cdot \tilde{R}_{II}$, d. i. der Stromwärme, erforderlichen Watt durch T_z zugeführt, indem man $\tilde{E}_z$ stufenweise so lange erhöht durch Änderung der primären Windungszahlen von T_z, bis die gewünschten Werte von $\tilde{J}_I$ und $\tilde{J}_{II}$ erreicht sind. Alsdann liefert das Wattmeter den Wert von $\tilde{W}_1 = \tilde{W}_v + \tilde{W}_z$ und nach Abzug der kleinen, in einer gesonderten Untersuchung ein für allemal festgestellten Verluste $\tilde{W}_z$ im Zusatztransformator die in A und B verlorenen Watt

$$\tilde{W}_v = 2\,(\tilde{W}_h + \tilde{W}_r) = \frac{\tilde{W}_1 - \tilde{W}_z}{2}.$$

Bei Gleichheit der Transformatoren wird also wegen der Parallelschaltung beider Umsetzungsapparate — bei Reihenschaltung, d. h. zweimaliger, nacheinander erfolgender Transformierung der primären Leistung wäre $\eta_t = \eta_I \cdot \eta_{II}$ und $\eta_I = \eta_{II} = \sqrt{\eta_t}$ —

$$\eta_A = \eta_B = \frac{\tilde{W}_{II}}{\tilde{W}_{II} + \tilde{W}_v} = \frac{\tilde{E}_{II} \cdot \tilde{J}_{II} \cdot \cos \varphi_{II}}{\tilde{E}_{II} \cdot \tilde{J}_{II} \cos \varphi_{II} + \frac{\tilde{W}_1 - \tilde{W}_z}{2}}.$$

Dieselbe Anordnung der Fig. 211 kann nicht nur durch Öffnen von S_3 und Schließen von S_4 und S_1 zur Messung der Eisenverluste $\tilde{W}_v' = 2\,\tilde{W}_h$ dienen, sondern durch Öffnen von S_1 und S_4 und Schließen von S_3 und S_2 auch zur Messung der Kupferverluste beider Transformatoren mit Hilfe der alsdann vorhandenen Kurzschlußschaltung.

In diesem Falle liefert nämlich die Wattmeterablesung praktisch den Wert

$$W_v'' = 2\,\tilde{W}_r + \tilde{W}_z,$$

also $\tilde{W}_r = \tilde{J}_I^2 \cdot \tilde{R}_I + \tilde{J}_{II}^2 \cdot \tilde{R}_{II} = \frac{W_v'' - \tilde{W}_z}{2}$ (siehe hierzu auch in **107**).

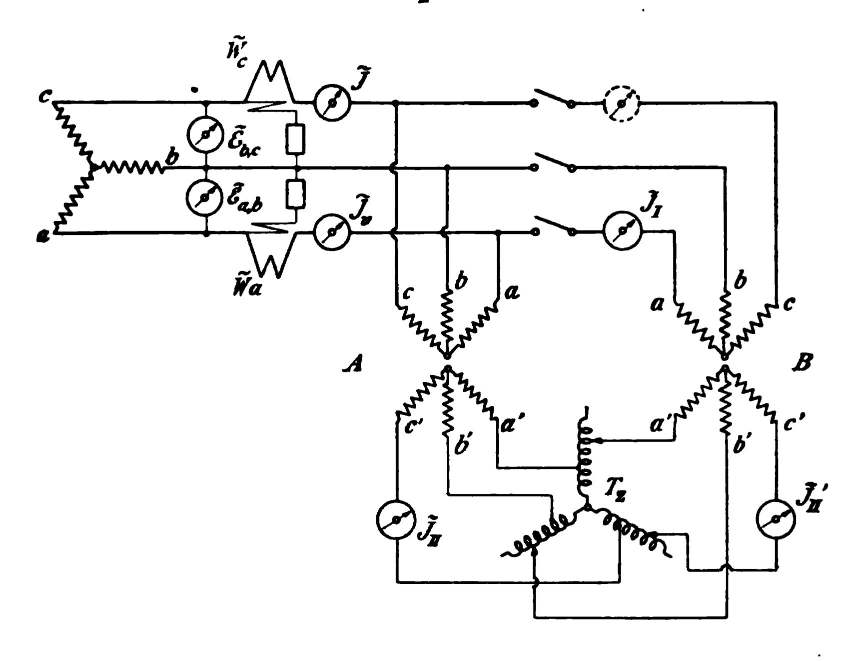


Fig. 212.

Für die Untersuchung von Drehstromtransformatoren erfährt die Schaltungsanordnung eine entsprechende Abänderung, ähnlich der früher bei den Umformern (**94**) angegebenen Schaltung, also etwa in der durch Fig. 212 angegebenen Weise, wenn der Zusatztransformator T_z, hier als Halbtransformator geschaltet, im Sekundärkreis angeordnet wird. Allerdings ist zu beachten, daß hier keine völlige Vergleichbarkeit mit der Schaltung von Fig. 211 vorliegt, insofern zwar die Eisenverluste $\tilde{W}_h$ wie dort in Parallelschaltung gedeckt werden, hingegen die Kupferverluste durch Einfügung von T_z in Reihenschaltung, doch wird der Fehler bei Benutzung der obigen reinen Parallelschaltungsformel nur geringfügig sein, wenn man anstelle der etwas verschiedenen $\tilde{J}_{II}$ und $\tilde{J}_{II}'$ den Mittelwert einsetzt. Natürlich ist anstelle von $\tilde{W}_1$ die ganze Drehstromleistung $\mathring{W}_1 = \tilde{W}_a + \tilde{W}_c$ zu setzen.

107. Wirkungsgrad aus Einzelverlusten. Erscheint die zuletzt angeführte Meßanordnung zu umständlich, oder ist nur ein einzelner Transformator für die Untersuchung verfügbar, so wird man auf die Ermittelung von η bei gleichzeitig normalen Belastungen im Eisen und Kupfer verzichten und durch getrennte und nacheinander vorgenommene Messung der Leerlaufleistung $\tilde{W}_0$ und der Kurzschlußleistung $\tilde{W}_k$ den Wert von η rechnen zu

$$\eta = \frac{\tilde{W}_{II}}{\tilde{W}_{II} + \tilde{W}_0(1+\varepsilon) + \tilde{W}_k(1+\delta)} = \frac{\tilde{E}_{II} \cdot \tilde{J}_{II} \cdot \cos\varphi_{II}}{\tilde{E}_{II} \cdot \tilde{J}_{II} \cdot \cos\varphi_{II} + \tilde{W}_0(1+\varepsilon) + \tilde{W}_k(1+\delta)},$$

wobei der Einfluß von $\tilde{J}_{II} \cdot \cos\varphi_{II}$ auf die erforderliche Spannungserhöhung durch ε (prozentualen Abfall) und auf die erforderliche (prozentuale) Stromerhöhung durch δ berücksichtigt werden möge.

Die Schaltungsanordnungen für Leerlauf- und Kurzschlußversuch entsprechen ganz den früher (78) bei den Maschinen angegebenen Schaltungen, nur

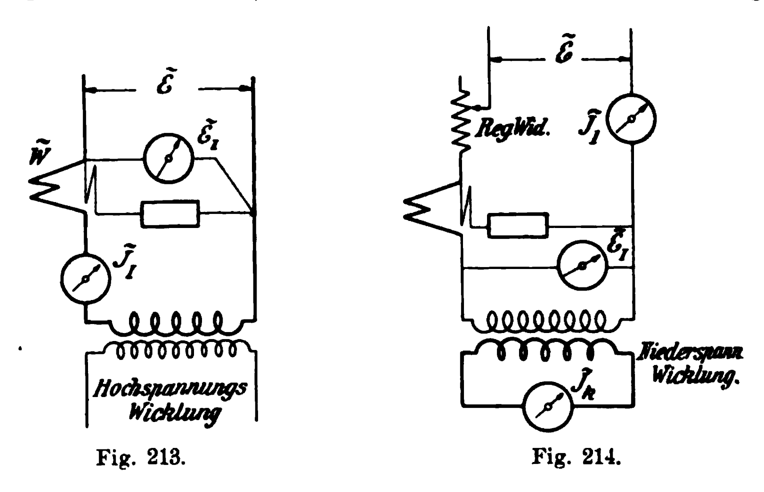


Fig. 213. Fig. 214.

ist zu beachten, daß man zum Zweck bequemerer und genauerer Messungen, namentlich beim Wattmeter, den Leerlaufversuch von der Niederspannungsseite aus vornehmen wird (Fig. 213), während man den Kurzschlußversuch, wie Fig. 214 andeutet, von der Hochspannungsseite aus vornimmt und zwar in beiden Fällen am betriebswarmen Transformator (76 in § 10). Zur Messung von $\tilde{J}_k$ wird ein Amperemeter mit möglichst kleinem Widerstand gewählt, dessen Klemmspannungskurve zwecks Korrektion am besten mit Gleichstrom vorher festgestellt wird, und die zugeführte Spannung $\tilde{E}_I$ wird stufenweise aus dem verfügbaren $\tilde{E}$ heraufreguliert, bis $\tilde{J}_k$ und $\tilde{J}_I$ die gewünschten Werte ergeben. Alsdann kann man setzen

$$\tilde{W}_k = \tilde{J}_k^2 \cdot \tilde{R}_k,$$

wobei der reduzierte wirksame (Wechselstrom-)Widerstand $\tilde{R}_k$ bei normaler Transformatorerwärmung sich zu

$$\tilde{R}_k = \frac{\tilde{W}_k}{\tilde{J}_k^2} = \tilde{R}_{II} + m^2 \cdot \tilde{R}_I$$

rechnet, wenn die Reduktion der Hochspannungswickelung auf die Niederspannungswickelung mit Hilfe des Wickelungs**verhältnisses** m erfolgt. Gegenüber dem Gleichstromwert $\overline{R}_k = \overline{R}_{II} + m^2 \overline{R}_I$ pflegt $\tilde{R}_k$ um 5 bis 25% größer zu sein (siehe ARNOLD, Wechselstromtechnik Bd. II Seite 281).

Die Bestimmung der Leerlaufverluste $\tilde{W}_0$ nach dem Schema der Fig. 213 wird man am besten bei gleichbleibender Wechselzahl mit steigenden Klemmenspannungen $\tilde{E}_I$ durchführen, wie dies bereits in **101** bei den Motoren angegeben wurde. Trägt man die erhaltenen Werte von $\tilde{W}_1$, falls nötig um den Betrag der Stromwärmeverluste $\tilde{J}_I^2 (R_I + R_A + R_H)$ in der Niederspannungswickelung (R_I), dem Amperemeter (R_A) und der festen Wattmeterspule (R_H) vermindert, zu den Werten von $\tilde{E}_I$ (als Abszissen) auf, so erhält man eine ähnliche Kurve (Fig. 215) wie die der Fig. 196, nur daß sie für $\tilde{E}_I = o$ wegen Abwesenheit der mechanischen Verluste durch den Nullpunkt geht. Im übrigen stellt diese Messung eigentlich eine Untersuchung des Eisengestells in magnetischer Hinsicht dar, sowie des Einflusses der Wirbelströme auf die Potenz, nach welcher diese $\tilde{W}, \tilde{E}$-Kurve ansteigt. Bei

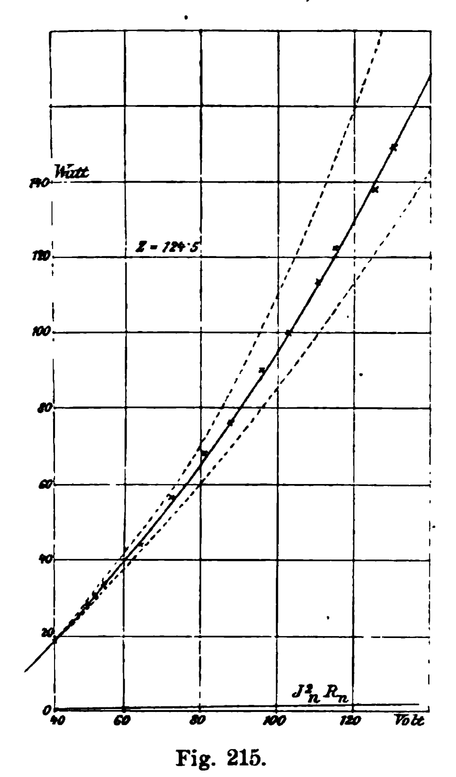


Fig. 215.

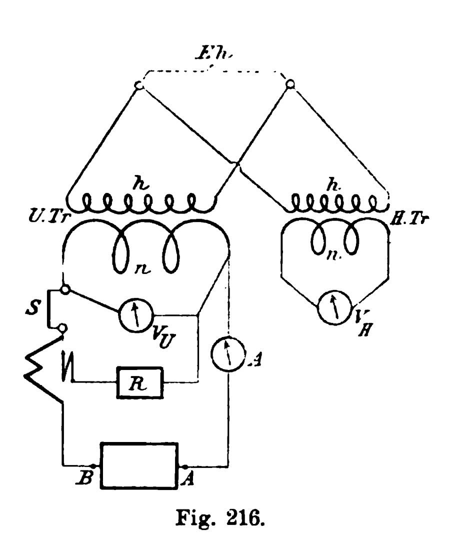


Fig. 216.

Fig. 215, die sich auf einen älteren Flachringtransformator von SCHUCKERT mit stärkeren Eisenblechen (normale Wechselzahl $z = 50$) bezieht, beträgt diese Potenz x, nach der Formel ermittelt

$$\tilde{W}_0' : \tilde{W}_0'' = \left(\frac{\tilde{E}'}{\tilde{E}''}\right)^x = \left(\frac{B'}{B''}\right)^x$$

etwa 1·75. Zum Vergleich ind die beiden Kurven für $x = 1·6$ und $x = 2·0$ strichliert in Fig. 215 eingetragen. Weiteres siehe bei den magnetischen Messungen in **171** ff., ebenda auch das Verfahren zur Trennung der Hysterese- und Wirbelströme unter Messung von $\tilde{W}_1$ nach Fig. 213 bei konstantem B aber variabler Periodenzahl u.

108. Spannungsabfall. Die Größe des (betriebstechnisch bei Transformatoren besonders wichtigen) Spannungsabfalls ε bei konstant gehaltener Primärspannung $_I\tilde{E}_k$, oder der

Grad der Selbstregulierung der Transformatoren abhängig von der sekundären Belastung $\tilde{J}_{II} \cdot \cos \varphi_{II}$, kann entweder direkt bei Veränderung dieser Belastung innerhalb der betriebsmäßigen Grenzen durch Beobachtung der sekundären Klemmenspannung $_{II}\tilde{E}_k$ erfolgen, oder indirekt nach dem Verfahren von KAPP durch einen Kurzschlußversuch (siehe **109**) in Verbindung mit der Bestimmung des wirksamen Widerstandes $\tilde{R}_k$ der Transformatorwickelungen. Während die erstere Methode für alle Transformatorkonstruktionen anwendbar ist, wird die letztere nur für eisengeschlossene Typen hinreichend zuverlässige Ergebnisse liefern, für diese in der Elektrotechnik ganz überwiegend vorkommenden Transformatoren aber alsdann auch, ihrer großen Einfachheit halber und wegen der umfassenden Gültigkeit oder Brauchbarkeit ihres Ergebnisses für alle Belastungsstromstärken $\tilde{J}_{II}$ und Leistungsfaktoren ($\cos \varphi_{II}$), wohl allgemein bevorzugt werden.

Für die unmittelbare Messung des Spannungsabfalles ε zwischen Leerlauf und Vollbelastung liefert das scheinbar einfachste Vorgehen der Messung

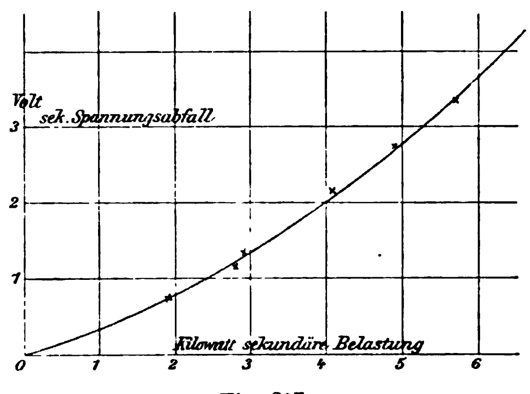


Fig. 217.

von $_{I}\tilde{E}_k$ und $_{II}\tilde{E}_k$ bei verschiedenen Belastungen zwischen Leerlauf und Volllast meßtechnisch keine befriedigenden Ergebnisse.

Der Wert von ε ist nämlich gegenüber der Spannung von $_{II}\tilde{E}_k$ selbst nur gering — bei induktionsfreier Belastung etwa 2 bis 3 $^0/_0$ —, so daß die Ungenauigkeit der Messung von $_{I}\tilde{E}_k$ bei den gewöhnlich vorliegenden großen Übersetzungsverhältnissen, ferner alle nicht zu vermeidenden kleinen Schwankungen der Primärspannungen, endlich die Fehler nicht ganz genauen Zusammenstimmens der beiden Voltmeter in ihren Eichwerten viel zu große prozentuale Unsicherheiten im Wert von ε selbst bedingen, um befriedigende Ergebnisse zu ermöglichen.

Man kann diese Unsicherheiten aber beseitigen, wenn man einen zweiten Transformator bei der Messung zu Hilfe nimmt, von etwa demselben Übersetzungsverhältnis, wie das des zu untersuchenden Transformators U. Tr. Doch braucht der Hilfstransformator H. Tr. keineswegs ein solcher genau gleicher Type zu sein, sondern es genügt jeder kleine Meßtransformator der sekundär angenähert gleiche Spannung liefert wie der unbelastete Versuchstransformator. Beide werden parallel an die Hochspannung $\tilde{E}_h$ gelegt, wie Fig. 216 andeutet. Ist zunächst bei geöffnetem Schlüssel S der Unterschied der beiden g l e i c h z e i t i g e n Voltmeterangaben $V_H - V_U = \varepsilon_0$, dann nach Schließen von S und Einregulieren des Belastungswiderstandes BA, der, ähnlich wie

in 78 Fig. 164 angegeben, durch Mischung der Widerstandsarten die gegewünschte Belastungsstromstärke $\tilde{J}_{II}$ und das gewünschte $\cos\varphi_{II}$ ermöglichen muß, die Ablesung im gleichen Augenblick V'_H und V'_U, so ist der gesuchte Spannungsabfall $\varepsilon = \varepsilon' - \varepsilon_0$, wenn $\varepsilon' = V'_H - V'_U$. Hierbei heben sich alle Fehler durch Abweichung der Primärspannung, Eichfehler der Voltmeter V_H und V_U selbsttätig heraus und die Bestimmung von ε zeigt die wünschenswerte Zuverlässigkeit, wie die Auftragung für einen 5 KW Transformator von Brown, Bovery & Co. bei induktionsfreier Belastung erkennen läßt (Fig. 217 aus Heinke, Wechselstrommessungen Seite 157).

Man kann natürlich auch die Spannungen der Niederspannungsseiten von H. Tr. und W. Tr. gegeneinander schalten (Fig. 218), etwa wie bei einer

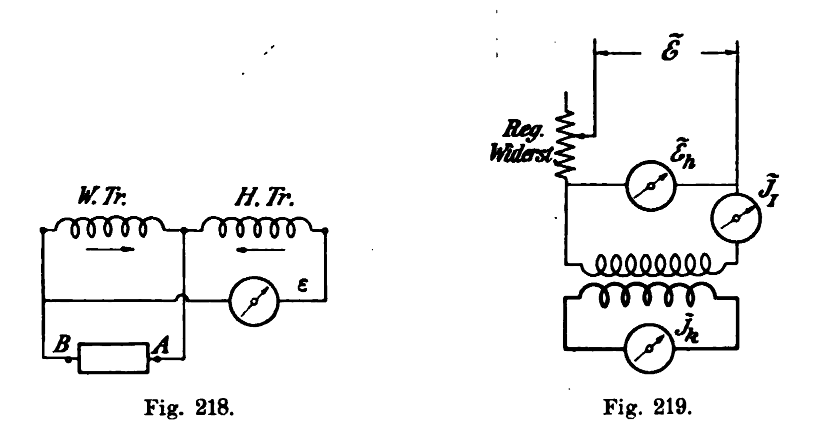


Fig. 218. Fig. 219.

Synchronisieranordnung und nur die Differenz $\tilde{E}_H - \tilde{E}_U = \varepsilon_0$ bei Leerlauf und $\tilde{E}'_H - \tilde{E}'_U = \varepsilon'$ bei Belastung durch ein geeignetes Voltmeter, etwa Hitzdrahtvoltmeter ohne Vorschaltwiderstand, zur Messung bringen. Auch ist vorgeschlagen worden diese aus der Gegenschaltung resultierende Differenzspannung wiederum durch einen Hilfstransformator zu erhöhen, etwa auf das Zwanzigfache, (Weiteres siehe hierzu Cl. Feldmann W. Tr. Bd. II, Seite 384), doch dürften diese Komplizierungen nur selten einem praktischen Bedürfnis entsprechen.

Ist man somit auch in der Lage den Spannungsabfall eines Transformators durch Differenzbeobachtungen der Klemmenspannungen von U. Tr. und H. Tr. zu ermitteln, so kann diese Bestimmung unter Umständen doch noch zu umständlich und zeitraubend erscheinen, abgesehen davon, daß ein passender Hilfstransformator oder geeignete Hochspannung nicht immer bei der Hand sind; man bedarf nämlich für jeden Leistungsfaktor ($\cos\varphi_{II}$) einer besonderen Meßreihe, oder, bei Beschränkung auf das ε bei Normalbelastung, einer besonderen Messung. Soll jedoch die Bestimmung genau unter den praktischen Anwendungsbedingungen durchgeführt werden, so wird sich eine solche unmittelbare Bestimmung nicht umgehen lassen.

109. Spannungsabfall nach Kapp.

In den meisten Fällen wird man sich aber mit einer mittelbaren Bestimmung von ε mittels einer Kurzschlußbeobachtung nach Kapp (ETZ 1895, 260) begnügen, wie ie bereits durch die Meßanordnung der Fig. 214 angegeben wurde. Die letztere kann man im Notfall, d. h. in Ermangelung eines geeigneten Wattmeter , auch noch soweit vereinfachen, daß man nur ein Amperemeter zur Me sung der Kurzschlußstromstärke $\tilde{J}_k$ der Niederspannungs-

wickelung, und ein Voltmeter zur Messung der hierzu erforderlichen Spannung $\tilde{E}_h$ verwendet (Fig. 219), die der Hochspannungswickelung vorsichtig durch Ausschalten des Regulierwiderstandes zugeführt wird, während man die Zerlegung (vgl. Fig. 220) de so beobachteten Wertes von $\tilde{E}_h$ in die Spannungs-komponente $\tilde{E}_s$ zur Deckung der Streuung (Restglied) und in die Kompo-

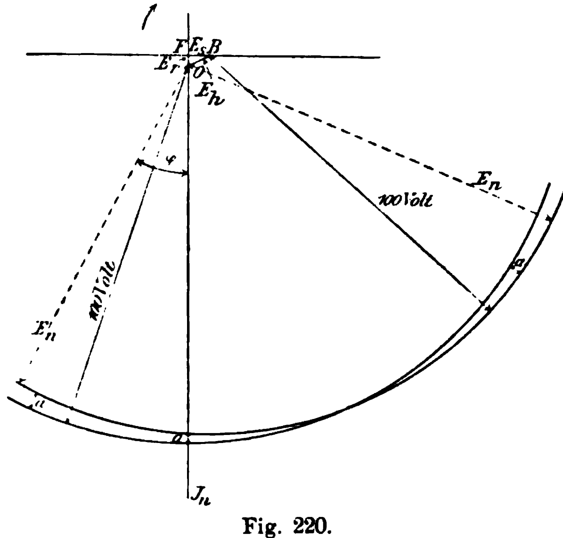


Fig. 220.

nente $\tilde{E}_r = \tilde{J}_I \cdot \tilde{R}_I + \frac{h}{n} \tilde{J}_{II} \cdot \tilde{R}_{II}$ zur Deckung des Ohmschen Spannungsabfalls aus den beobachteten Werten von $\tilde{J}_k = \tilde{J}_{II}$ und aus $\tilde{J}_I$ in Verbindung mit den für sich gemessenen betriebswarmen Wickelungswiderständen $\overline{R}_I$ und $\overline{R}_{II}$ rechnet. Will man aber der Unsicherheit einer Schätzung der Vergrößerung von $\tilde{R}_k$ gegenüber $\overline{R}_k$ (vgl. hierzu in **107**) entgehen, so wird man die Wattmetermessung nach dem Schema der Fig. 214 vorziehen. Weiteres über die Bedeutung und Zerlegung des Spannungsabfalldreiecks *FOB*, sowie der Abstände *a* zwischen den Kreisen, die um *O* und *B* mit der normalen Klemmenspannung $\tilde{E}_n$ geschlagen werden (Fig. 220) und den Spannungsabfall links vom Schnittpunkt, bzw. die Spannungserhöhung rechts vom Schnittpunkt, abhängig von φ zur Darstellung bringen, siehe a. a. O. oder bei der Theorie der Tran formatoren in Bd. V dieses Handbuches.

Wellenstrommessungen.

Einleitung.

110. Allgemeines und Einteilung.

In den vorausgehenden Abschnitten dieses Bande ist die Messung der elektrischen Größen behandelt für den Fall, daß der elektrische Ausgleich entweder als stationäre gleichgerichtete Strömung, oder als periodische, zum Nullniveau symmetrische Wechselströmung, oder endlich als einmaliger kurzer Stromstoß erfolgt. Neuerdings ist aber immer mehr eine Mischform der beiden erstgenannten Grenzfälle zu praktischer Bedeutung gelangt, die als Wellenstrom bezeichnet (I, 2 in **152**) eine Zerlegung in ein Gleichstromniveau und eine diesem aufgelagerte äquivalente Wechselkomponente zuläßt, gleichzeitig aber auch bei dem verschiedenartigen Verhalten, welches die einzelnen Instrumentengruppen (vgl. II, 1 in **22 ff.**) gegenüber den beiden Stromarten zeigen, besondere Meßschaltungen und Vorsichtsmaßregeln bedingt, um eine richtige Messung dieser komplizierteren elektrischen Ausgleichsform zu ermöglichen.

Die Grundlagen dieser Ausgleichsform, sowie ihre Entstehungsursachen oder die Wellenstromerreger, sind bereits in Hdb. Bd. I, 2 an verschiedenen Stellen näher behandelt worden, so in **152** bis **155**, **158** endlich in **257** bis **266**. Hier wäre aber noch die meßtechnische Ergänzung zu geben, was um so notwendiger erscheint, als die Erfahrung gezeigt hat, daß bei den Untersuchungen derartiger Wellenstromerscheinungen durchaus nicht immer das erforderliche Maß von Kritik gegenüber den Angaben der benutzten Meßinstrumente zur Anwendung gelangt ist, so daß die aus diesen Angaben gezogenen Schlüsse teils unvollständig, teils fehlerhaft und irreleitend sind (vgl. hierzu HEINKE 1899 Ann. d. Ph. Bd. 69, S. 612).

Aus den Ableitungen der Beziehungen zwischen den Wellenstromgrößen und ihren Gleich- und Wechselkomponenten (Hdb. I, 2 in **152**) einerseits, aus den Angaben über die Wirkungsweise der Instrumentengruppen gegenüber diesen Komponenten (Hdb. II, 1 in **22 ff.**) andrerseits läßt sich unschwer ableiten, welche Zusammenstellung von Instrumenten erforderlich ist, um eine ausreichende Messung der Wellenstromgrößen zu ermöglichen. Es sind aber zur Vermeidung von Trugschlüssen noch einige Punkte zu beachten, auf die im Folgenden eingegangen werden soll. Hierbei ist aus praktischen Gründen eine Scheidung der Betrachtung nach der sekundlichen Wechselzahl

der Wechselkomponente empfehlenswert, da hiervon die Benutzbarkeit der Meßinstrumente und in gewissen Fällen auch der Meßschaltung abhängt.

Neben der Mischung von Gleichstrom mit technischem Wechselstrom, also bei einer aufgelagerten symmetrischen Wechselkomponente von etwa 25 bis 75 sekundlichen Perioden, wie sie in allen Stromkreisen zwischen einer Kollektorbürste und einem Schleifring rotierender Umformer oder auch von Dreileitermaschinen, ferner bei der direkten Umformung technischen Wechselstromes in einseitig gerichtete Strömung durch irgend welche elektrische Ventilanordnungen (vgl. I, 2 in **259 ff.**) usw. auftritt, kommen hier praktisch noch Wechselkomponenten von sehr abweichenden Wechselzahlen in Frage. Durch Abänderung der Verhältnisse in den Wellenstromerregerkreisen kann man leicht Wechselkomponenten von einzelnen Perioden pro Sekunde bis hinauf zu einigen Hunderttausend erhalten. Läßt sich zwar auf diese Weise das Gebiet der Wechselzahlen in kontinuierlicher Veränderung weit leichter und in viel weiteren Grenzen als beim Maschinenwechselstrom überstreichen, so hat man es praktisch, je nach der Wahl des Wellenstromerregers, doch meist entweder mit Wechselzahlen zu tun, welche sich nicht allzu weit von den technischen entfernen, oder mit Wechselzahlen, welche sehr viel höher sind als diese. Ersteres wird außer bei den Wellenstromerregern erster Ordnung (I, 2 in **152**), welche eine Mischung von Maschinenwechselstrom mit Gleichstrom liefern, auch bei den Wellenstromerregern zweiter Ordnung meist der Fall sein, welche — wie die verschiedenen Gruppen der „Unterbrecher" — feste oder flüssige Schwingungsglieder zur Erzeugung der periodischen Widerstandsschwankung enthalten.

Das letztere, d. h. das Auftreten sehr hoher sekundlicher Periodenzahlen des Wechselgliedes, wird namentlich bei dem Auftreten periodischer Widerstandsschwankungen in leitenden Gasstrecken, wie z. B. dem Wellenstromlichtbogen, vorliegen. Jedenfalls genügt es für die folgenden Betrachtungen diese beiden Hauptfälle der verhältnismäßig kleinen und großen Periodenzahlen des Wechselgliedes gesondert zu betrachten, da die Folgerungen für zwischenliegende oder außerhalb anschließende Fälle unschwer zu ziehen sind.

Sollte in einem besonderen Falle die sekundliche Periodenzahl des aufgelagerten Wechselgliedes so klein sein — etwa 1 auf die Sekunde oder noch weniger — daß die benutzten Meßinstrumente eine selbsttätige Integration nicht mehr ausführen, so könnte man zwar aus den Grenzen der Zeigerschwankungen, bzw. aus den daraus abgeleiteten Mittellagen immer noch Schlüsse auf die Zusammensetzung ziehen in der im Folgenden angegebenen Weise; im allgemeinen wird man aber in diesem Falle die Aufnahme der Stromkurve nach einem Kontaktmacher- oder Oszillographen-Verfahren (siehe **51 ff.**) vorziehen unter Benutzung der daraus sich ergebenden Grenzwerte.

A. Messung und Zerlegung von Wellenstromstärken abhängig von dem Verhalten der Meſsinstrumente.

111. Ermittelung der Komponenten. Einfluß der Wech[illegible]

Handelt es sich darum, bei einem elektrischen Strömungsvorgang festzustellen, ob er Wellenstromcharakter besitzt, also aus einem Gleichstromniveau und einer aufgelagerten periodischen Schwankung, kurzweg einem

Wechselgliede. besteht, so kann dies am einfachsten im allgemeinen dadurch geschehen, daß man zwei geeignete Amperemeter, die vorher zusammen mit reinem Gleichstrom geeicht wurden, in Reihe schaltet und die gleichzeitigen Angaben beobachtet. Ist das eine Amperemeter der Klasse I (vgl. II, 1 in 22) entnommen, d. h. mit Dauermagnet als dem einen Feldfaktor ausgerüstet, das zweite ein Instrument mit quadratischer Stromstärkewirkung, also ein Hitzdrahtamperemeter oder Dynamometer, so wird die Abweichung in den Angaben beider gegenüber der vorausgegangenen Gleichstromeichung nicht nur den Wellenstromcharakter der untersuchten Strömung anzeigen, sondern auch sofort eine Zerlegung und Messung ihrer beiden Komponenten ermöglichen, da sich neben dem vom Gleichstromamperemeter (mit Dauermagnet) unmittelbar angezeigten Gleichstromniveau $\bar{J}$ die Wechselkomponente $\tilde{J}$ zu

$$\tilde{J} = \sqrt{\overset{w}{J}{}^2 - \bar{J}^2}$$

ergibt.

Es fragt sich nun, ob die so ermittelte Wechselkomponente $\tilde{J}$ in allen Fällen richtig ist. Für niedere sekundliche Wechselzahlen ist dies, wie zahlreiche Versuche ergeben haben, tatsächlich so genau der Fall, wie die Ablesungen an den Instrumenten erwarten lassen. Bei sehr hohen Wechselzahlen macht sich aber das schon früher (6) erwähnte Verhalten der Instrumente gegen Wechselstrom abhängig von ihrer Konstruktion in steigendem Maße bemerkbar. Zwar wird das Glied $\bar{J}$ stets richtig angegeben, gleichgiltig ob man Gleichstromamperemeter mit oder ohne Nebenschluß verwendet, da die Gleichstromkomponente genau so wie der reine Gleichstrom nur nach dem Verhältnis der Ohmschen Widerstände eine Teilung erfährt und von der Verschiedenheit der Selbstinduktion der beiden Zweige unberührt bleibt. Nicht so bei den Instrumenten, welche die Wellenstromstärke $\overset{w}{J}$ anzeigen. Hier werden die Dynamometer, welche mit Nebenschluß arbeiten, oder welche eine Neigung $\lesseqgtr 90^0$ der Spulen gegeneinander aufweisen, wegen des Einflusses der Selbstinduktion bzw. der Wechselinduktion mit wachsender Periodenzahl eine gegenüber der Gleichstromeichung zunehmende Abweichung in den Angaben der Wechselkomponente aufweisen und verhältnismäßig rasch für Wellenstrommessungen unbrauchbar werden. Günstiger liegen die Verhältnisse bei Hitzdrahtinstrumenten, doch ist auch hier bei Verwendung von Nebenschlüssen Vorsicht wegen des mit der Wechselzahl zunehmenden Einflusses der Oberflächenwirkung (Hautwirkung) geboten, da ihre Ungleichheit zwischen Nebenschluß und Hitzdraht bei sehr hohen Wechselzahlen (vgl. 6) Fehler in den Angaben von $\overset{w}{J}$, gewöhnlich in Form zu hoher Werte, zur Folge hat.

112. Verhältnismäßige Kleinheit einer Komponente.

Zu beachten bleibt weiterhin, daß im Falle verhältnismäßig kleiner Werte der Gleichstromkomponente $\bar{J}$ gegenüber der Wechselkomponente $\tilde{J}$ bei dem Bestreben einer möglichst genauen Messung von $\bar{J}$ nicht eine Überlastung des Amperemeters durch den nicht zur Anzeige gelangenden, aber die Erwärmung der Wickelung mitbedingenden Wert von $\tilde{J}$ stattfindet.

Ist umgekehrt $\tilde{J}$ klein gegenüber $\bar{J}$, so ist eine genauere Bestimmung von $\tilde{J} = \sqrt{\overset{w}{J}{}^2 - \bar{J}^2}$ sehr erschwert, ja von einer bestimmten Grenze ab überhaupt nicht mehr durchführbar, weil die Beobachtungsfehler bei $\overset{w}{J}$ und $\bar{J}$ einen zu großen Einfluß auf das Resultat gewinnen. Für $\tilde{J} = 0{\cdot}1\,\bar{J}$ beträgt

die Erhöhung von $\overset{w}{J}$ gegenüber $\bar{J}$ nur mehr etwa $^1/_2\,^0/_0$, so daß für noch kleinere Werte der s i c h e r e Nachweis von $\tilde{J}$ auf d i e s e m Wege kaum mehr möglich ist, noch weniger natürlich eine auch nur ungefähre Messung von $\tilde{J}$.

Als Ergänzung zu dieser i n d i r e k t e n Messung der $\tilde{J}$-Komponente besteht eine weitere Möglichkeit zur d i r e k t e n Messung von $\tilde{J}$ neben der bereits oben angegebenen direkten Messung von $\bar{J}$ mit Hilfe eines Gleichstromamperemeters. Benutzt man ein Amperemeter der Klasse IV (II, 1 in 27), d. h. schaltet man einen auf Wechselinduktion beruhenden Stromzeiger in Reihe mit jenem Gleichstrominstrument, wie Fig. 221 andeutet, so kann man mit Hilfe eines derartigen r e i n e n Wechselstromzeigers die $\tilde{J}$-Komponente gleichsam herausfiltrieren oder heraussieben, ähnlich wie dies der r e i n e Gleichstromzeiger mit der $\bar{J}$-Komponente tut.

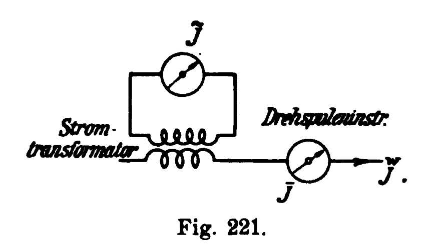


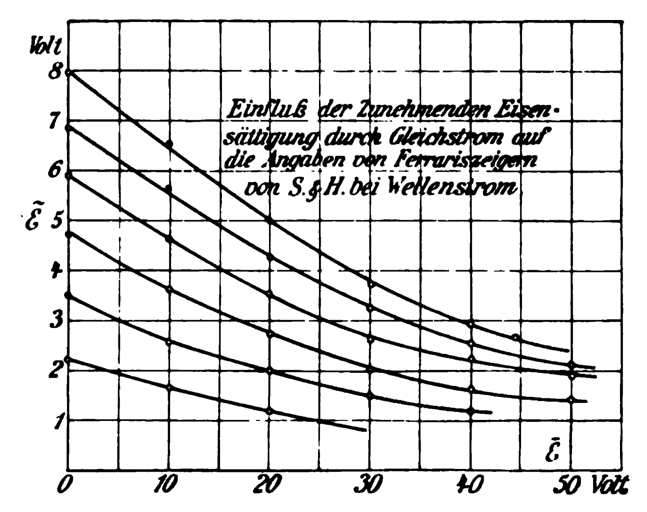
Fig. 221.

Als ein derartiger Wechselstromzeiger kann entweder ein beliebiges, für die vorliegende Wechselzahl geeichtes Amperemeter mit Stromtransformator Verwendung finden, wie Fig. 221 andeutet, oder auch ein Ferrariszeiger (Drehfeldzeiger). Nach dem Obigen ist ohne weiteres klar, daß man die Wellenstromstärke $\overset{w}{J}$ nicht noch besonders durch ein Amperemeter mit quadratischer Stromwirkung, meist Hitzdrahtinstrument, zu messen braucht, sondern

$$\overset{w}{J} = \sqrt{\bar{J}^2 + \tilde{J}^2}$$

rechnen kann.

118. Einfluß der Eisensättigung. Für den Fall, daß die $\tilde{J}$-Komponente beträchtlich ist, sind die Angaben des $\tilde{J}$-Instruments noch einer kritischen Prüfung über den Einfluß der Eisen-



Dem $\bar{E}$ zugeschaltete Gleichspannung, wenn dem Meßbereich 0 bis 10 Volt des Ferrarisvoltmeters 44 Ω induktionsfreier Widerstand zugeschaltet war.

Fig. 222.

sättigung zu unterziehen, falls, wie bei den Ferrariszeigern und den meisten Stromtransformatoren, Eisenkerne in Frage kommen. Nach meinen Untersuchungen sind in den Fällen, wo $\bar{J}$ sehr groß gegenüber $\tilde{J}$ ist und das

Eisen daher einseitig magnetisch stark beansprucht wird, die Angaben bei Ferrariszeigern, namentlich Voltmetern, stark von dem wahren Wert von $\tilde{J}$ abweichend und viel zu niedrig, wie z. B. die Untersuchung eines Ferrariszeigers erkennen läßt, der mit für sich gemessenen Gleich- und Wechselstromkomponenten in verschiedenen Mischungsverhältnissen beschickt wurde und die in Fig. 222 dargestellten Ablesungen ergab. Jede Einzelkurve zeigt die Ablesungen bei konstant bleibender Wechselspannung (Schnittpunkt mit der Ordinatenachse) von normaler Wechselzahl ($z = 100$), aber zunehmenden Gleichspannungen (Abszissen) von verhältnismäßig hohen Beträgen. Die Stromstärken in den Wickelungen besitzen im vorliegenden Fall noch etwas größere Gleichstromkomponenten, weil der Gleichstromwiderstand des Voltmeters kleiner ist als sein Wechselstromwiderstand.

Außerdem ist natürlich die starke Beschränkung in der Ferrariszeigerbenutzung abhängig von der Wechselzahl zu beachten, welche sie bei steigenden Wechselzahlen sehr bald unbrauchbar macht. Die Verschiedenheit der beiden Stromzweige im Instrument hinsichtlich Selbstinduktion hat mit wachsender Periodenzahl eine zunehmende Zusammendrückung des elliptischen Drehfeldes zur Folge, bis die Angaben eine nur unmerkliche Größe annehmen (vgl. hierzu Hdb. II, 1 in **27**).

Bei Benutzung von Stromtransformatoren sind gleichfalls diese beiden Punkte zu beachten, d. i. einmal der Einfluß der Wechselzahl, der hier wohl leichter als bei den Ferrariszeigern zu berücksichtigen ist, da keine Stromteilung vorliegt; ein zweites Mal der Einfluß der Eisensättigung durch die Gleichstromkomponente. Für sehr hohe Wechselzahlen wird diese Meßanordnung zwar nicht wie ein Ferrariszeiger unbrauchbar, aber die Anwesenheit von Eisen wird, abgesehen von den Schwierigkeiten der obenerwähnten Sättigungserscheinung, noch eine weitere in Gestalt des starken Einflusses der Wirbelströme nebst allen ihren Folgeerscheinungen verursachen. Aus diesem Grunde ist es vorzuziehen, für sehr hohe Wechselzahlen eisenfreie Transformator- bzw. Transmitteranordnungen zu benutzen, deren Wechselinduktionskoeffizient M unabhängig von J (vgl. hierzu in **26**) und ein für allemal bestimmt ist. Alsdann kann man unter Umkehrung der früher (**26**) verwendeten Formel die Wechselkomponente $\tilde{J}_I$ aus der gemessenen Sekundärspannung $\tilde{E}_{II}$ zu

$$\tilde{J}_I = \frac{\tilde{E}_{II}}{\omega_i \cdot M}$$

bestimmen, wenn ω_i bekannt ist, bzw. nach dem früher (**45**) angegebenen Verfahren bestimmt wird.

Zum Schluß sei noch erwähnt, daß Weicheiseninstrumente bei Wellenstrom Angaben machen, welche mehr oder weniger angenähert der Wellenstromstärke $\overset{w}{J}$ entsprechen werden, daß aber Richtung und Größe der Abweichungen von ihrem Verhalten gegen Wechselstrom abhängen und im allgemeinen einer besonderen Untersuchung nach dieser Richtung bedürfen, um ihre Verwendung zur Messung von Wellenstromstärken zu ermöglichen.

B. Messung und Zerlegung von Wellenspannungen.

114. Mittelbare Messung der Wechselkomponente.

Alle stromverbrauchenden Voltmeter zeigen zunächst als Schwachstromamperemeter ein in der Grundlage gleiches Verhalten wie die nach dem-

selben Prinzip konstruierten Amperemeter, so daß die im Vorausgehenden als notwendig betonte Kritik der Ablesungen auch für die Voltmeter Giltigkeit behält. Es kommen jedoch hier, bei dem im allgemeinen weniger unmittelbaren Zusammenhang zwischen Ablesung und Meßgröße (Spannung), noch einige weitere beachtenswerte Punkte hinzu.

Daß die Voltmeter mit Dauermagneten, wie z. B. die verbreiteten Drehspuleninstrumente, das Gleichspannungsniveau heraussieben und zur Messung bringen, ist einleuchtend, da für dieses wie für reine Gleichspannung nur der OHMsche Widerstand des Voltmeters maßgebend ist, während der Einfluß der Selbstinduktion zusammen mit dem Fortfall einer Ausschlagswirkung durch die Wechselkomponente in Wegfall kommt. Schaltet man daher parallel zu einem solchen Voltmeter, das die $\overline{E}$-Komponente von $\overset{w}{E}$ mißt, ein anderes mit quadratischer Spannungswirkung und vernachlässigbarer Selbstinduktion, am besten einen Hitzdraht- oder einen elektrostatischen Spannungszeiger, so wird dieser den Effektivwert $\overset{w}{E}$ der Wellenspannung (II, 1 in **21**) zur Anzeige bringen. Aus beiden wird sich alsdann, ähnlich wie oben bei der Stromstärke, die Wechselkomponente $\tilde{E}$ rechnen lassen zu

$$\tilde{E} = \sqrt{\overset{w}{E}^2 - \overline{E}^2}.$$

Die Anwendung von dynamometrischen Spannungszeigern wird nur dort zulässig erscheinen, wo der Einfluß ihrer Selbstinduktionskoeffizienten klein genug ist, um nicht lästige Korrektionen zu verursachen, die außerdem die Zuverlässigkeit der Messung leicht ungünstig beeinflussen können. Bei allen höheren Periodenzahlen des Wechselgliedes wird man daher die Verwendung von Hitzdrahtinstrumenten vorziehen, bei welchen sich der Selbstinduktionskoeffizient leicht gegenüber R verschwindend klein halten läßt, oder von elektrostatischen Spannungszeigern, wo er praktisch ganz verschwindet und außerdem der in vielen Fällen stark ins Gewicht fallende Vorteil sehr viel kleinerer Meßstromstärken vorliegt. Die Differenz der Angaben zwischen einem induktionsfreien Voltmeter und einem solchen (dynamometrischen) von bekannter Selbstinduktion kann zur Bestimmung von ω bzw. der Wechselzahl herangezogen werden, wie in **45** angegeben (vgl. auch Ann. d. Ph. 1900 Bd. I S. 460 ff.).

Wird diese indirekte Bestimmung der Wechselkomponente ($\tilde{E}$) durch die Messung der beiden Spannungen $\overset{w}{E}$ und $\overline{E}$ an den Enden einer Leiterstrecke von verhältnismäßig hoher Reaktanz (ωL) gegenüber ihrem OHMschen Widerstand R durchgeführt, was praktisch öfter vorkommt, so ist auch hier zur Vermeidung einer Schädigung des Gleichstromvoltmeters auf folgendes zu achten: Die große Wechselkomponente kommt zwar bei letzterem nicht zur Anzeige, macht sich aber nichtsdestoweniger bei der Wärmewirkung und dem Stromverbrauch des Gleichstromvoltmeters geltend. Letzteres ist namentlich auch für Korrektionen bezüglich Wattverbrauch des Voltmeters zu beachten. Zur Vermeidung von Überlastungen der Voltmeterwickelung ist daher der Meßbereich bzw. Voltmeterwiderstand stets nach dem Wert der vorhandenen $\overset{w}{E}$ zu bemessen, nicht nach $\overline{E}$.

Schließlich ist auch hier, ebenso wie bei den Amperemetern zu bedenken, daß der die Drehspule durchfließende Wechselstrom unter Umständen eine starke Probe auf die Güte des Dauermagneten und damit auf die Konstante des Instruments darstellt, der nur gute Dauermagnete mit einem hohen

Sicherheitsfaktor gegen Entmagnetisierung (vgl. I, 2 in **287**) gewachsen sind. Eine Nachprüfung der Konstante des Instruments wird nach der ersten stärkeren Beanspruchung mit Wellenstrom bzw. Wellenspannung daher angezeigt sein.

115. Unmittelbare Messung der Wechselkomponente. Für viele Fälle, in denen in erster Linie die Wechselkomponente $\tilde{E}$ der auftretenden Wechselspannungen interessiert, ist das vorgenannte indirekte Verfahren, abgesehen von dem Erfordernis zweier Voltmeter, auch für eine raschere Orientierung über die $\tilde{E}$-Werte etwas unbequem wegen der erforderlichen Rechenoperation. Außerdem tritt bei verhältnismäßiger Abnahme der $\tilde{E}$-Komponente gegenüber der $\overline{E}$-Komponente dieselbe Schwierigkeit des Nachweises bzw. der Genauigkeit der Messung auf, welche schon in **112** bei den Stromstärken näher besprochen wurde. Aus beiden Gründen wird eine direkte Messung von $\tilde{E}$ durch Heraussiebung willkommen sein. Dieses Verfahren läßt sich hier nicht nur in der bereits bei den Stromstärken angeführten Weise (**112**) durch Anwendung von Wechselinduktionsvoltmetern, z. B. Ferrariszeigern, oder von Spannungstransformatoren anwenden, sondern außerdem — wenigstens bei hohen Wechselzahlen — mit Hilfe einer vor ein passendes Wechselstromvoltmeter (Hitzdrahtvoltmeter) geschalteten Kapazität durchführen.

Was zunächst die erste Art anlangt, die namentlich für niedere Wechselzahlen und nicht zu große $\overline{E}$-Komponenten in Betracht kommt, so sind für Wellenspannungen mit technischen Wechselzahlen die Ferrariszeiger sehr bequem, solange die $\overline{E}$-Komponente merklich kleiner ist als der Meßbereich des Voltmeters. Wird aber $\overline{E}$ verhältnismäßig zu groß, so ist einmal die obenerwähnte Frage der Überlastung zu prüfen und außerdem der Einfluß einer etwaigen e i n s e i t i g e n Eisensättigung auf die Angaben des Instrumentes näher zu untersuchen (**113**).

Dieselbe Schwierigkeit bereitet eine verhältnismäßig große $\overline{E}$-Komponente auch bei der Anwendung von Spannungstransformatoren und gestaltet die Messung kleiner $\tilde{E}$-Komponenten nach diesem Verfahren noch schwieriger als bei den Stromstärkemessungen, ja vereitelt ihre Ausführung in extremen Fällen vollständig.

Handelt es sich nicht um eine g e n a u e r e Messung, sondern nur um eine ungefähre Schätzung der aufgelagerten Wechselkomponente, so leistet das Telephon *T* mit Transmitter *Tr* und vorgeschalteter Glühlampe *Gl* oder einem anderen geeigneten Widerstand gute Dienste (vgl. Fig. 223).

Dieses Verfahren zur experimentellen Feststellung des ungefähren Wertes der $\tilde{E}$-Komponente von schwachen Wellenspannungen ist schon alt und besitzt deshalb eine gewisse Bedeutung, weil a l l e Gleichstrommaschinen mit Kollektor, d. h. mit Summierung vieler in ihrer Phase verschobener Spannungshalbwellen, keine reine Gleichspannung liefern, wie z. B. Akkumulatoren, sondern eine schwache Wellenspannung. Die Höhe des Tones liefert ein Maß für die Zahl der die Spannung der Gleichstrommaschine zusammensetzenden Halbwellen bzw. der Kollektorsegmente, während die Stärke des Tones ein ungefähres Maß der Ungleichförmigkeit bei der erzeugten Gleichspannung abgibt.

116. Kondensator als Wechselspannungsfilter. Um die obenerwähnte Schwierigkeit, welche die $\overline{E}$-Komponente bei den Wechselinduktionsapparaten mit verhältnismäßig kleinen Ohmschen Widerständen bereitet, zu überwinden, kann man die $\overline{E}$-Komponente von der Meßvorrichtung der Wechselspannung dadurch ganz fernhalten, daß man einen

Kondensator C vorschaltet (Fig. 224), welcher als Filter für die $\tilde{E}$-Komponente wirkt, d. h. nur diese durchläßt. Hierbei ist aber nicht zu übersehen, daß im allgemeinen die vom Wechselspannungsmesser angezeigte Spannung $\tilde{E}_s$ kleiner sein wird als die zu messende volle $\tilde{E}$-Komponente, da diese sich geometrisch zerlegt nach Charakter und Größe der Wechselstromwiderstände. Der Wechselstromwiderstand des vorgeschalteten Kondensators beträgt $\left(\frac{1}{\omega \cdot \tilde{C}}\right) \Omega$. Die meßtechnische Verwendung dieses Hilfsmittels wird hierdurch folgendermaßen beeinflußt, da die zur Verfügung stehenden Kapazitäten wohl nur selten die Größenordnung des Mf überschreiten werden: Für niedere Wechselzahlen bzw. ω-Werte (etwa unterhalb 1000, so daß also $\frac{1}{\omega \cdot \tilde{C}} > 1000\,\Omega$) wird die Verwendung dieses Verfahrens zur Messung von $\tilde{E}$ auf elektrostatische Spannungszeiger beschränkt bleiben, deren Kapazität sehr klein gegenüber C ist, um Korrektionen möglichst zu vermeiden, d. h. $\tilde{E}_s$ praktisch gleich $\tilde{E}$ zu machen; für kleine Werte von $\tilde{E}$ (unterhalb 20 Volt)

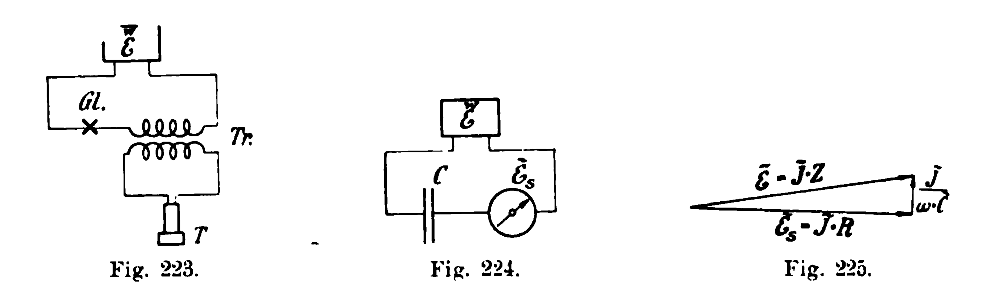


Fig. 223. Fig. 224. Fig. 225.

käme noch im Laboratorium die Verwendung eines passenden Spiegelelektrodynamometers in Frage, das zusammen mit der Kapazität C als Wechselspannungszeiger geeicht wird. Nur muß in letzterem Falle die Kritik der Dynamometerablesungen sich darauf erstrecken, ob nicht etwa durch Oberschwingungen Resonanzwirkungen im Meßstromkreise auftreten, welche eine Erhöhung der Spannung am Dynamometer über den Wert der zu messenden $\tilde{E}$-Komponente bewirken, was nach meinen Beobachtungen zuweilen eintritt.

Für sehr hohe Wechselzahlen bzw. ω-Werte (etwa oberhalb 10 000) wird der scheinbare Wechselstromwiderstand $\left(\frac{1}{\omega \tilde{C}}\right)$ so herabgedrückt, daß auch die Verwendung von Hitzdrahtvoltmetern ohne, bzw. ohne e r h e b l i c h e Korrektionen möglich wird. Ist z. B. $\omega = 20\,000$, also für $C = 1$ Mf die „Kapazitätsreaktanz" $\frac{1}{\omega \tilde{C}} = 50$, so wird für ein Hitzdrahtvoltmeter von etwa 600 Ω (bei 130 Volt Meßbereich) die Verminderung von $\tilde{E}_s$ gegenüber $\tilde{E}$ wegen der geometrischen Zusammensetzung (vgl. Fig. 225) bereits kleiner als $\frac{1}{2}$ %. Bei noch höheren Werten von ω, wie sie gewöhnlich beim Wellenstromlichtbogen vorliegen, wird also vielfach der Unterschied ganz vernachlässigbar und die Anwendung dieses Verfahrens oft sehr bequem (vgl. hierzu in **121** bis **124**). Allerdings ist stets eine Überprüfung nach der Richtung nötig, ob die an $\tilde{E}_s$ wegen der Vorschaltung von $\tilde{C}$ sich ergebende

Korrektion vernachlässigbar klein ist, oder auf Grund der aus Fig. 225 sich ergebenden Beziehungen angebracht werden muß.

C. Messung von Wellenstromleistungen.

117. Zerlegung der Wellenstromleistung.

Die experimentelle Ermittelung der Leistungsverhältnisse ist beim Wellenstromausgleich von um so größerer Wichtigkeit, als ein voller Einblick nur durch die Klärung der energetischen Seite gewonnen werden kann. Auf diesen Punkt wurde bereits nachdrücklich in Hdb. I, 2 (**158**, **159**) hingewiesen und daselbst wurden auch an einem Zahlenbeispiel die eigenartigen Leistungsverschiebungen zwischen den einzelnen Stromkreisteilen aufgezeigt. Daraus geht hervor, daß im Wellenstromerzeuger keinesfalls das Produkt $\overset{w}{J}_g \cdot \overset{w}{E}_g$, wie es die Ablesungen der Gleichstrominstrumente liefern, als Leistung umgesetzt zu werden braucht, sondern daß die wahre Wellenstromleistung

$$\overset{w}{W} = \overset{w}{J}_g \cdot \overset{w}{E}_g - \overset{w}{E}_\sim \cdot \overset{w}{J}_\sim \cdot \cos \varphi$$

beträgt, wenn $\overset{w}{E}_\sim$ bzw. $\overset{w}{J}_\sim$ die Wechselkomponenten des Wellenstromes an den Klemmen des Wellenstromerregers und $\overset{w}{E}_\sim \cdot \overset{w}{J}_\sim \cdot \cos \varphi$ die Leistung dieser Wechselkomponenten, welche im ganzen übrigen Stromkreis in Form von Wechselstromenergie verbraucht und meist in Wärme übergeführt wird. In jenem Zahlenbeispiel betrug die zugeführte und scheinbar im Wellenstromerreger (Wehnelt-Unterbrecher) verbrauchte Gleichstromleistung $\overset{w}{J}_g \cdot \overset{w}{E}_g = 389$ Watt, hingegen die wahre vom Wattmeter angezeigte und im Wellenstromerreger wirklich in nichtelektrische Energieform übergeführte Leistung nur 119 Watt, während der ganze übrige Rest von 270 Watt in Form von Wechselstromenergie in den übrigen Teilen des Stromkreises (außerhalb des Wellenstromerregers) verbraucht und überwiegend in Wärme, zum Teil aber auch durch Transformation in elektrische Wechselstromleistung übergeführt wurde.

Diese Verhältnisse sind abgesehen von einem volleren Einblick in die Ausgleichsverhältnisse auch für viele praktische Fragen, namentlich für eine einwandfreie Behandlung der Wirkungsgradfrage bei allen Wellenstromanordnungen, u. a. auch der elektrolytischen Umformung von Wechselstrom in gleichgerichteten Strom (siehe hierzu 1906 S.E.V. Bd. IX Heft 1—3) von der größten Bedeutung, aber bisher meist gar nicht, oder nicht ausreichend beachtet worden, weshalb auf die Messung der Wellenstromleistung hier nochmals eingegangen sei.

Bei Starkstrom, wie z. B. bei der Verwendung eines elektrolytischen Unterbrechers oder beim Betriebe größerer Induktorien (Transformatoren) mit anderen Unterbrechervorrichtungen, ferner bei elektrolytischen Gleichrichtern von Wechselstrom, bei Betrieben mit Wellenstromlichtbogen usw. wird man vor allen Dingen die Verwendung des Wattmeters anstreben, als der bequemsten und technisch sichersten Art der Messung von periodisch wechselnden Leistungen (vgl. hierzu **62ff.**, sowie **118**).

Die obenerwähnte Gleichung für die Beziehung der 3 in Frage stehenden Leistungen, nämlich der

Wellenstromleistung $\overset{w}{W} = \frac{1}{T}\int_0^T \overset{w}{e} \cdot \overset{w}{i} \cdot dt,$

ferner der aus der primären Gleichstromquelle, wie sie wenigstens bei den meisten Wellenstromerregern mit Ausnahme der elektrolytischen Umformung von Wechselstrom vorliegt, abgegebenen

Gleichstromleistung $\overline{W} = \overset{w}{E}_g \cdot \overset{w}{J}_g$

und endlich der

Wechselstromleistung $\tilde{W} = \overset{w}{E}_\sim \cdot \overset{w}{J}_\sim \cdot \cos\varphi,$

kann man auch kürzer schreiben

$$\overset{w}{W} = \overline{W} - \tilde{W} \qquad \text{oder}$$
$$\overline{W} = \overset{w}{W} + \tilde{W}.$$

Für die Wattmetermessung kommt, neben der aus den Angaben der Gleichstrominstrumente ohne weiteres folgenden Gleichstromleistung $\overline{W}$, also entweder die direkte Messung der Wellenstromleistung $\overset{w}{W}$, oder die direkte Messung der Wechselstromleistung $\tilde{W}$ in Frage, während $\tilde{W}$ bzw. $\overset{w}{W}$ indirekt aus der obigen Beziehung folgt.

118. Wattmeterschaltungen und Arten der Ermittelung. Die direkte Messung von $\overset{w}{W}$ erfolgt, wenn beide Wattmeterspulen, d. i. die Hauptstromspule und die Spannungsspule, von Wellenstromstärken durchflossen sind, wobei die Integration, welche das Wattmeter wegen der verhältnismäßig großen Schwingungsdauer seines beweglichen Systems selbsttätig ausführt, die effektive mittlere Wellenstromleistung $\overset{w}{W}$ anzeigt (vgl. Hdb. I, 2 in **158**). Wird jedoch die Anordnung so getroffen, daß auch nur eine der beiden Spulen nur von der Wechselkomponente durchflossen wird, so zeigt das Wattmeter die effektive Wechselstromleistung $\tilde{W}$ an, weil eine Gleichstromkomponente bzw. ihr Kraftlinienfeld mit jeder Wechselkomponente bzw. ihrem Wechselfeld von einer Periode, die gegenüber der mechanischen Schwingungsperiode des beweglichen Systems klein ist, den Ausschlag Null liefert, d. h. an dem Ausschlag, der von den beiden Wechselkomponenten $i_H \cdot i_{Sp}$ bzw. $n_H \cdot n_{Sp}$ hervorgerufen wird, nichts ändert. Auch hier zeigt natürlich der Daueranschlag den Integralwert

$$\frac{1}{T}\int_0^T i_H \cdot i_{Sp}\, dt = \tilde{J}_H \cdot \tilde{J}_{Sp} \cdot \cos\varphi = C_W \cdot \tilde{N}_H \cdot \tilde{N}_{Sp} \cdot \cos\varphi,$$

wenn $\cos\varphi$ den Leistungsfaktor oder die äquivalente Phasenverschiebung zwischen den beiden periodischen Strom- bzw. Feldfaktoren angibt (vgl. **63**).

Eine Schaltung der ersten Art mit direkter Messung von $\overset{w}{W}$ zeigt die Anordnung des Wattmeters in Fig. 228, wie sie zuerst von mir zur Untersuchung der elektrischen Verhältnisse beim elektrolytischen Unterbrecher (Wehnelt-Unterbrecher) Verwendung fand. Eine Schaltung der zweiten Art zeigen die Anordnungen des Wattmeters in Fig. 229 und in Fig. 230 bei den Untersuchungen am Wellenstromlichtbogen, sowie die Schaltung des Wattmeters unter Benutzung eines Stromtransformators in Fig. 231 bei Erzeugung eines Wellenstromlichtbogens aus Gleichstrom und technischem Wechselstrom in verschiedenem Mischungsverhältnis.

119. Verwendbarkeit der Wattmetertypen. Die praktisch brauchbare Verwendung der verschiedenen möglichen Wattmetertypen, sowie auch der soeben angeführten Schaltweisen des Watt-

meters selbst, hängt wiederum in erster Linie von der sekundlichen Periode des Wechselgliedes ab und zwar wie folgt: Bei niederen Wechselzahlen sind neben den Torsionswattmetern mit stets senkrecht gekreuzten Spulen und Abwesenheit merklicher Wechselinduktion zwischen den Spulen auch die jetzt wegen ihrer größeren Bequemlichkeit fast allgemein verwendeten, direktzeigenden Wattmeter mit wechselndem Neigungswinkel und damit veränderlicher Wechselinduktion zwischen den Spulen verwendbar, solange der Einfluß der letzteren in Gestalt der Wechselinduktionsspannung $\tilde{E}_{II} = \tilde{J}_I \cdot \omega \cdot M$ gegenüber der Meßspannung vernachlässigbar klein bleibt (vgl. hierzu die Ausführungen in **28**).

Wird aber ω sehr groß, wie z. B. beim Wellenstromlichtbogen, so wird die Verwendung der direktzeigenden Wattmeter unzulässig. So würde z. B. bei dem in **28** angeführten Wattmeter von S. & H. mit einem M von etwa 0·14 Mh in der Nulllage für eine Hauptstromspulenstärke $\tilde{J}_I$ von 10 Amp. bei einem Wert $\omega = 40\,000$ die durch Wechselinduktion erzeugte Spannung $\tilde{E}_{II}$ bereits betragen:

$$\tilde{E}_{II} = 10 \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 0{\cdot}14 \cdot 10^{-3} = 56 \text{ Volt.}$$

Häufig kommen aber noch weit höhere Werte von ω vor und bedingen somit die Anwendung von Wattmetern, bei denen stets M praktisch den Wert Null besitzt, wie z. B. die älteren Torsionswattmeter oder die neueren Kompensation wattmeter (Krukowsky-Fischer D.R.P. Nr. 170872 vgl. in **63**).

120. Einfluß der Nebenkoeffizienten von Vorschaltwiderständen.

Als weitere Schwierigkeit kommt bei den hohen ω-Werten der Einfluß der Nebenkoeffizienten der Wattmetervorschaltwiderstände auf die beim Ausschlag wirksame Phasenverschiebung $\varphi' = \sphericalangle(\tilde{J}_H, \tilde{J}_{Sp})$ hinzu, ein Einfluß, der bei den niederen Wechselzahlen leicht so klein gehalten werden kann, daß gar keine, oder nur eine geringfügige Korrektion an der Wattmeterablesung die Folge ist (vgl. hierzu in **64**).

Wie früher (II, 1 in **16**) angegeben wurde, besitzen die zurzeit noch überwiegend verwendeten Bifilarwiderstände eine merkliche resultierende Kapazität als Nebenkoeffizient, welche bei hohem ω-Wert außer einer erheblichen Verkleinerung des Ausgleichwiderstandes Z gegenüber dem Gleichstromwert R eine merkliche Verschiebung δ des Spannungsspulenstromes $\tilde{J}_{Sp}$ gegenüber der zu messenden Spannung $\tilde{E}$ im Sinne der Voreilung bewirkt, so daß die zu messende Phasenverschiebung φ zwischen Spannung und Stromstärke bei voreilender Spannung zu

$$\varphi = \varphi' - \delta$$

wird, während bei resultierender Selbstinduktion im Spannungspulenkreise

$$\varphi = \varphi' + \delta'$$

würde.

Bei höheren Werten von φ, wie sie bei derartigen Untersuchungen von Wellenstromerscheinungen nahezu die Regel sind, wird nun der Vorzeichenwechsel und die merkliche Größe von δ eine gänzliche Verzerrung der Wattmeterangaben W' bis zum Wechsel der Richtungen zur Folge haben können, so daß eine Unkenntnis der Nebenkoeffizienten im Spannungsspulenkreis gleichbedeutend ist mit der Unbrauchbarkeit der Wattmeterablesungen, weil sie völlig irreleitend sind, wie folgender Fall erläutern möge: Bei den Untersuchungen am Wellenstromlichtbogen mit der in Fig. 229 wiedergegebenen Schaltung wurden 2 Beobachtungssätze durchgeführt unter sonst möglichst gleichen Bedingungen, jedoch einmal mit dem zum Torsionswatt-

meter von GANZ & Co. beigegebenen **Bifilar-Vorschaltwiderstand** mit einer resultierenden Kapazität $C_r = 0{\cdot}012$ Mf (vgl. II, 1 in **16**) und ein andermal unter Ersetzung desselben durch einen sehr nahe gleich großen **Lametta-Widerstand** ohne merklichen Nebenkoeffizienten. Im ersten Fall hatte also δ einen beträchtlichen Wert im Sinne der Voreilung, im letzteren δ' wegen des Selbstinduktionskoeffizienten der beweglichen Spule einen kleineren Wert im Sinne der Nacheilung. Der Schwingungskreis enthielt einen Glimmerkondensator $C = 1{\cdot}1$ Mf und als Selbstinduktion L nur die feststehende Wattmeterspule, welche einschließlich Zuleitungen etwa $L = 0{\cdot}093$ Mh besaß. Es ergaben sich folgende Ablesungen:

a) mit Lamettawiderstand

$W' = c \cdot a$	$\tilde{J}$ Amp.	E Volt	$\overset{w}{E}$ Volt	$\tilde{J}$ Amp.	$\tilde{E}_L$ Volt	$\overset{w}{E}_C$ Volt	$\tilde{E}_C$ Volt	$\tilde{E} = \sqrt{\overset{w}{E}^2 - E^2}$	ω_1 etwa
$C = -23{\cdot}6$	4·95	39·4	52	5·9	48·5	73	65	35·5	90000
$L = +55{\cdot}0$	4·95	39·4	51·5	5·9	49·6	75		34·6	
$T = +24{\cdot}2$	4·8	39·2	52·5	5·9	49·1	75		36·3	

b) mit Bifilarwiderstand

$W' = c \cdot a$	$\tilde{J}$ Amp.	E Volt	$\overset{w}{E}$ Volt	$\tilde{J}$ Amp.	$\tilde{E}_L$ Volt	$\overset{w}{E}_C$ Volt	$\tilde{E}_C$ Volt	$\tilde{E} = \sqrt{\overset{w}{E}^2 - E^2}$	ω_1 etwa
$C = +47{\cdot}8$	4.85	40·2	54·5	5·9	48·3	74·8	63	36	90000
$L = +9{\cdot}7$	5·0	38·5	51	5·8	48·0	71·8	61	32	
$T = +47{\cdot}2$	4·9	40·0	53	5·8	48·5	74·5	63	34	

Hierbei wird durch die Vorzeichen $+$ bzw. $-$ bei Schaltung des Wattmeters auf die Kapazität C, die Selbstinduktion L, oder die Summe beider (T) die Richtung der notwendigen Torsion nach rechts oder links von der Nulllage ausgedrückt.

Der starke Einfluß des verschiedenen Vorzeichens von δ springt bei den Ablesewerten W' sofort in die Augen und ist besonders bei den Kondensatorwerten W'_C durch den Wechsel des Vorzeichens recht auffallend. Zu bemerken ist noch, daß die Wattmeterkonstante $c = c_i \cdot R$ sich aus der Dynamometerkonstanten $0{\cdot}0242$ im ersten Fall, bei 501 Ω Lametta-Vorschaltwiderstand zu der beweglichen Spule mit etwa 5 Ω, zu 1·22 ergab, im zweiten bei 495 Ω Bifilarwiderstand zu 1·21; ferner daß gemäß der Schaltung nach Fig. 229, jedoch mit Versetzung der Hauptstromspule des Wattmeters **anstelle** von L, bei den Werten für C sich als Korrektion wegen des mitgemessenen Wattverbrauchs der Spannungsspule der Betrag von $(\tilde{E}_C)^2 : R$ oder 10·5 bzw. 10·8 Watt ergibt. Nach Anbringung der Korrektion erhält man bei a das $W'_C = -34{\cdot}1$ und bei b das $W'_C = +37{\cdot}0$. Die Beziehung

$$W'_T = W'_L + W'_C,$$

welche für stationäre Verhältnisse wegen des skalaren Charakters der Leistungen stets bestehen bleiben muß, ist also mit Rücksicht auf die etwas schwankenden Verhältnisse am Lichtbogen und die Schwierigkeiten bei der Durchführung der Messungen ausreichend erfüllt.

Wollte man im vorliegenden Fall an den Ablesewerten W' die durch δ bedingten Korrektionen anbringen (vgl. hierzu in **64**), um die wahren Leistungen zu erhalten, so würden die Abweichungen des Korrektionsfaktors von 1 prozentual recht groß ausfallen, was immer eine ziemliche Unsicherheit in das Resultat hineinbringt.

121. **Kompensationsverfahren zur Ermittelung sehr kleiner Leistungsfaktoren.**

Um nun bei hohen ω-Werten die Werte von $\delta = \sphericalangle(\tilde{E}, J_{Sp})$ möglichst klein und damit den Korrektionsfaktor nahe bei 1 zu halten, kann man folgendes Kompensationsverfahren anwenden: Man benutzt einen Vorschaltwiderstand ohne merklichen Nebenkoeffizienten (etwa Lamettawiderstände) für die Spannungsspule, so daß die Reaktanz $\omega \cdot L_{Sp}$ der Spannungsspule eine Verzögerung $+\delta$ des Spannungsspulenstromes $\tilde{J}_{Sp}$ gegenüber der zu messenden Spannung $\tilde{E}_{Sp}$ bewirkt. Schaltet man nun in den Spannungsspulenkreis in Reihe mit Vorschaltwiderstand und beweglicher Spule eine veränderbare Kapazität C_{Sp} (Fig. 226), so kann man damit zwei Verbesserungen der Meßverhältnisse herbeizuführen: Einmal gelangen stets die Wechselspannungen allein unter Abfiltrierung der Gleichspannung in den Spannungsspulenkreis, wodurch dieser entlastet und die Korrektion wegen ihres Wattverbrauchs verkleinert wird. Ein zweites Mal — und dies stellt im vorliegenden Fall den größeren Vorteil dar — ist es durch Variation von C_{Sp}

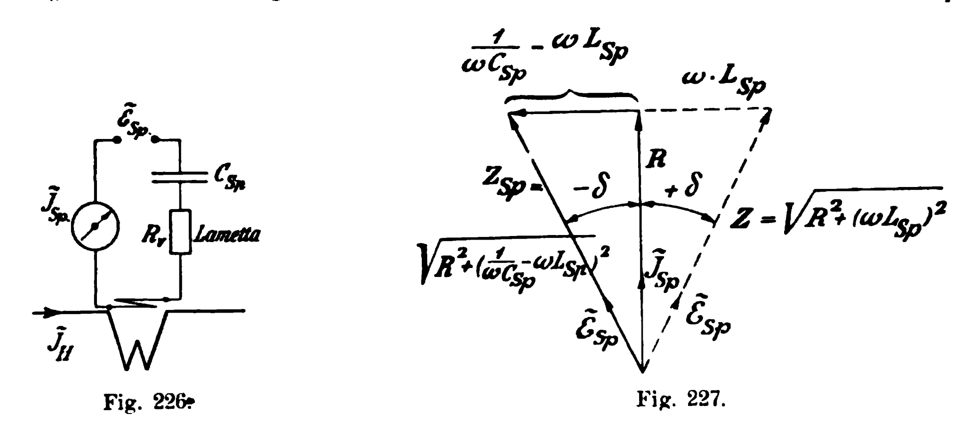


Fig. 226. Fig. 227.

möglich, entweder $\delta = 0$ zu machen (vgl. hierzu Fig. 227), oder ein Nullverfahren zur Bestimmung e i n e r Phasenverschiebung im Kreisdiagramm anzuwenden.

Das Verbringen von δ auf Null ist praktisch nur in gewissen Fällen durchführbar und bedingt ein passendes Amperemeter (Hitzdrahtinstrument) zur Messung und Feststellung des Strommaximums $\tilde{J}_{Sp} = \tilde{E}_{Sp} : R$, d. h. des Grenzfalles $Z = R$.

Das Nullverfahren ergibt sich auf folgende Weise: Wählt man z. B. C_{Sp} kleiner als $\frac{1}{\omega^2 \cdot L_{Sp}}$, d. i. kleiner als bei dem benutzten ω zur Kompensation des L_{Sp} der beweglichen Spule (etwa 1·35 Mh) erforderlich ist, in diesem Fall also kleiner als $\frac{740}{\omega^2}$ Farad, so eilt der Spannungsspulenstrom vor (vgl. Fig. 227). Man kann nun δ so einregulieren, daß der Ausschlag W'_L (in einem anderem Falle auch W'_C) praktisch zu Null wird; alsdann liefert die berechenbare Größe von $-\delta$ den Winkelwert, welcher dem $\tilde{E}_L$ gegenüber $\tilde{J}$ an 90° Phasenverschiebung fehlt.

Dieses Verfahren und die Auswertung der Beobachtungszahlen mögen an folgendem Zahlenbeispiel gezeigt werden: Bei der nach Fig. 230 ausgeführten Schaltung wurde der Schwingungskreis des Wellenstromlichtbogens aus einer n o m i n e l l e n Kapazität C von 7·1 Mf. überwiegend Paraffinpapierkondensatoren neben 1·1 Mf Glimmer, gebildet und als Selbstinduktionskoeffizient

nur die Hauptstromspule des Wattmeters mit etwa 0·093 Mh belassen (durch Kurzschließen des L in Fig. 230). Als OHMscher Widerstand des Schwingungskreises, mit Gleichstrom im warmen Zustand gemessen, fand sich für die Hauptstromspulen des Wattmeters (Nr. 169) und des Hitzdrahtamperemeters (Nr. 71405)

$$R_{169} + R_{71\,405} = 0{\cdot}04 + 0{\cdot}31 = 0{\cdot}071\ \Omega.$$

Wurde bei C_{Sp} der Wert 1·1 Mf eingeschaltet, so war der Ausschlag W'_L, etwa $+21{\cdot}5$, bei $C_{Sp} = 0{\cdot}4$ Mf nur noch $+5{\cdot}2$ und zwischen 0·37 und 0·36 Mf wurde die Nulllage passiert, so zwar, daß für $C_{Sp} = 0{\cdot}36$ Mf der Ausschlag nur noch $-0{\cdot}2$ betrug. Die Messung wurde also bei diesem Werte von C_{Sp} durchgeführt und lieferte die folgenden Beobachtungswerte, wobei der Wert von $\tilde{E}_C$ zur Kontrolle noch durch ein elektrostatisches Multicellularvoltmeter bestimmt wurde:

Nr. der Messung	J Amp.	$\overline{E}$ Volt	$\tilde{E}$ Volt	$\tilde{J}$ Amp.	$\tilde{E}_L$ Volt	$\tilde{E}_C^{w}$ Volt	$\tilde{E}_C$ Volt	α_W	$\tilde{J}_{Sp}$ Amp.
617	5·3	45·8	43·5	9·85	36·8	74·5	60	$L = -\ 0{\cdot}2$	ca. 0·063
618	5·4	45·0	41·5	9·75	36·4	73·5	58	$T = +95{\cdot}0$	0·070
619	5·4	46·4	42	9·7	36·0	73·0	58	$C = +95{\cdot}0$	0·108

Die Auswertung dieser Beobachtungszahlen ergab:

Nr. der Messung	$W' = 1{\cdot}30\,\alpha$	Volt × Ampere	$\cos\varphi'$	φ'	$\varphi = \varphi' \pm \delta$	$\cos\varphi$	W Watt	W corr.	$\tilde{R} = W : \tilde{J}^2$
617	$L = -\ 0{\cdot}26$	362	−0·0007	90°25′	87°	0·053	19·2	19·2	0·196 Ω
618	$T = +123{\cdot}5$	407	0·304	72°18′	77°50′	0·245	100·0	100·0	1·05 Ω
619	$C = +123{\cdot}5$	563	0·220	77°19′	80°50′	0·159	89·5	82·9	0·88 Ω

Hierbei wurde folgendermaßen verfahren, wenn die Horizontalreihe L die Werte für den Schwingungskreisteil zwischen Punkt 1 und 2, T diejenige zwischen 1 und 3 und C diejenige zwischen 2 und 3 angibt: Der Ausgleichwiderstand des Spannungsspulenkreises ergab sich zu

$$\tilde{E}_C : \tilde{J}_{Sp} = 58 : 0{\cdot}108 = 537\ \Omega_s,$$

wobei der OHMsche Widerstand etwa 529 Ω betrug. Sonach wurde

$$W' = 0{\cdot}00242 \cdot 537 \cdot \alpha = 1{\cdot}30\,\alpha$$

ausgerechnet. Das Verhältnis von W' zu den zugehörigen VA, d. h. zu $\tilde{E}_L \cdot \tilde{J}$ bzw. $\tilde{E} \cdot \tilde{J}$ bzw. $\tilde{E}_C \cdot \tilde{J}$ lieferte die äquivalente Phasenverschiebung φ' zwischen dem Hauptstrom $\tilde{J}$ und dem Spannungsspulenstrom $\tilde{J}_{Sp}$. Dieses φ' unterscheidet sich von der wahren äquivalenten Phasenverschiebung um

$$\pm\,\delta = \operatorname{arctg}\left(\frac{\dfrac{1}{\omega \cdot C_{Sp}} - \omega L_{Sp}}{R_{Sp}}\right) = \frac{87 - 54}{529} = 0{\cdot}0625.$$

Hieraus folgt δ zu etwa 3°30′ hinreichend genau, wenn auch der wirksame Wert von C_{Sp} zu etwa 0·29 Mf eingesetzt nur angenähert zutrifft (vgl. hierzu in **30**). Aus dem Leistungsfaktor $\cos\varphi$ und den Voltampere folgen nun die wahren Watt, von denen der Wert für C noch um etwa $6{\cdot}6 = \frac{59^2}{529}$

Watt zu verkleinern ist. Der Wert von ω_i ergibt sich aus den beobachteten Werten nach der Beziehung $\frac{\tilde{E}_L}{\tilde{J} \cdot L}$ zu nahe 40 000.

Bildet man schließlich noch den wirksamen Widerstand $\tilde{R}$ zu $(W : \tilde{J}^2)\ \Omega$, so bleibt nach Abzug des Amperemeterwiderstandes mit 0·031 Ω von 0·196 Ω noch 0·165 Ω für die Hauptstromspule des Wattmeters, was eine Steigerung seines warmen Gleichstromwiderstandes $\overline{R}$ auf etwa den vierfachen Wert bedeuten würde. Diese Erhöhung von $\tilde{R}$ gegenüber $\overline{R}$ durch Oberflächenwirkung und Wirbelströme erklärt auch die beobachtete auffallend starke Erwärmung der Hauptstromspule.

D. Schaltungen zur Untersuchung von Wellenstromerregern.

122. Reihenschaltung des Schwingungskreises mit der Gleichstromquelle.

Als Abschluß der Wellenstrommessungen sei noch eine Zusammenstellung der verschiedenen vollständigen Meßanordnungen gegeben, wie sie zur Untersuchung der Wellenstromverhältnisse bei verschiedenen Wellenstromerregern vom Verfasser benutzt und als besonders geeignet gefunden wurden. Näheres siehe hierüber in den folgenden Aufsätzen des Verfassers: Über Wellenströme ETZ 1899 Heft 29 und 30 oder auch Ph.Z. I, 8; Über Wellenstromenergie 1900 Ph.Z. I, 197 oder ausführlicher in V. d. V. z. B. d. G. 1900, 115; Zur Messung elektrischer Größen bei periodisch veränderlichen Strömen 1899 Wied. Ann. 69, 612; Über Wellenstromerreger 1900 Ann. d. Ph. 1 Seite 326 und 441; Untersuchungen am Wellenstromlichtbogen 1904 V. d. V. z. B. d. G. Heft 10 Seite 417.

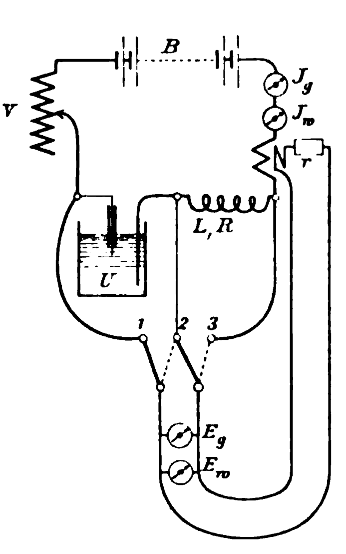


Fig. 228.

Fig. 228 stellt noch einmal die zuerst verwendete Schaltung zur Klärung der Verhältnisse bei elektrolytischen Unterbrechern (WEHNELT-Unterbrecher) dar. Sie erwies sich hierfür als besonders glücklich und dürfte auch für die größte Zahl der Fälle, in denen es sich um Wellenstrom mit kleineren Periodenzahlen (vgl. oben in **110**) handelt, am besten zur Untersuchung geeignet sein, wenn auch abweichende Anordnungen der Einzelteile des Stromkreises sinngemäße Änderungen zur Folge haben werden. Charakterisiert ist die Schaltung durch die Messung und Zerlegung der Wellenstromstärke mit Hilfe zweier geeigneter Stromzeiger (WESTON- und Hitzdraht-Amperemeter) im Hauptstromkreis; durch die Aufdeckung der Wellenspannungsverhältnisse mit Hilfe der Messung an den zwei aneinanderstoßenden Stromkreisteilen, welche durch ihr gegensätzliches Verhalten der Leitungskoeffizienten an der Spannungsresonanz beteiligt sind, unter Benutzung zweier parallelgeschalteter, umschaltbarer Spannungszeiger (WESTON- und Hitzdrahtvoltmeter); endlich durch die Bestimmung der elektrischen Leistungsverteilung mit Hilfe eines Wattmeters, dessen Hauptstromspule vom Wellenstrom des Hauptkreises durchflossen wird und dessen Spannungs-

spulenkreis gleichzeitig mit den Voltmetern umschaltbar gemacht ist und durch 3 Messungen jene Verteilung einschließlich einer Kontrolle liefert. Ein Zahlenbeispiel für eine Messungsreihe mit dieser Schaltung wurde bereits Hdb. I, 2 in **158** angeführt und ihre Auswertung ebenda besprochen.

Der Wellenstromausgleich entsteht beim elektrolytischen Unterbrecher und allen ähnlichen selbsttätigen Wellenstromerregern durch Reihenschaltung der Schwingungsglieder mit den anderen Teilen des Hauptstromkreises, so daß der ganze Hauptstromkreis einschließlich Batterie von dem erregten Wellenstrom durchflossen werden muß.

128 Parallelschaltung von Schwingungskreis und Gleichstromkreis.

Wesentlich anders liegen die Verhältnisse, wenn der Wellenstrom praktisch auf einen bestimmten Teil des Stromkreises (Lichtbogen) beschränkt bleibt, indem zu diesem ein Schwingungskreis p a r a l l e l geschaltet wird, der die maßgebenden elektrischen Schwingungsglieder, d. i. Kapazität C

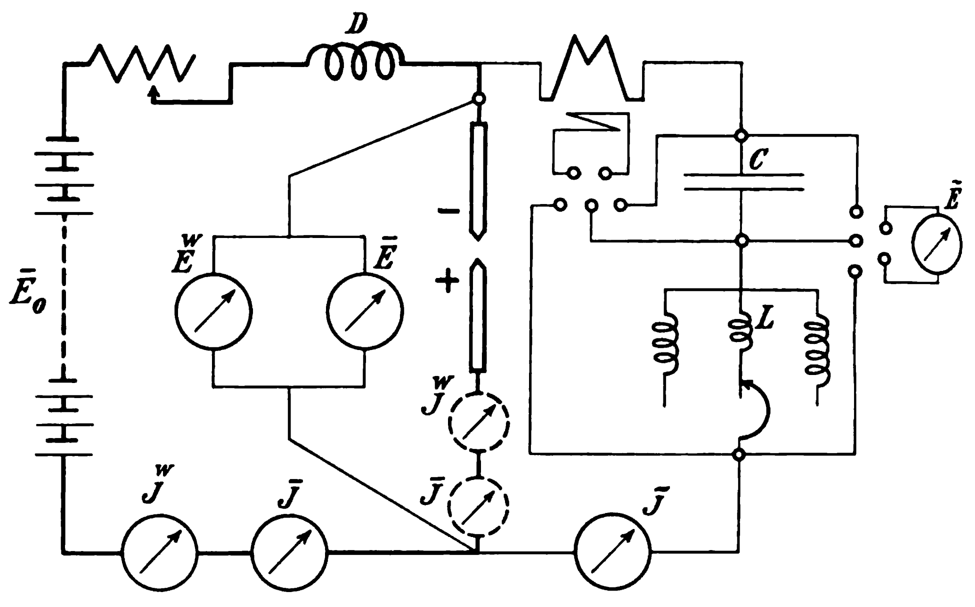


Fig. 229.

und Selbstinduktion L, in Hintereinanderschaltung enthält. In diesem Fall kann man praktisch eine Dreiteilung der ganzen Anordnung (vgl. Fig. 229) vornehmen: Der Batteriestromkreis bis zur Abzweigung des Schwingungskreises führt praktisch Gleichstrom J, wenn die Drosselspule D eine größere Selbstinduktion besitzt, was stets der Fall sein wird; der parallel zur Lichtbogenstrecke geschaltete Schwingungskreis führt reinen Wechselstrom $\tilde{J}$, da die Kapazität C keinen Gleichstrom durchläßt; die Lichtbogenstrecke gehört den beiden vorgenanntenStromkreisen an und führt daher Wellenstrom $\overset{w}{J}$, der sich so genau aus $\bar{J}$ und $\tilde{J}$ als Komponenten zusammensetzt, wie zahlreiche Versuche ergeben haben, daß eine besondere Messung von $\overset{w}{J}$ praktisch überflüssig wird, so daß die in Fig. 229 strichliert gezeichneten Amperemeter fortfallen können.

Was die übrige Meßanordnung betrifft, so werden die Abänderungen gegenüber Fig. 228 durch die etwas komplizierteren Verhältnisse bedingt. An Amperemetern braucht man praktisch auch nur 2, nämlich das eine (Weston-Amperemeter) zur Messung von $\bar{J}$ aus der Batterie, das andere

(Hitzdraht-Amperemeter) zur Messung von $\tilde{J}$ im Schwingungskreis. Daß die Einschaltung eines weiteren Stromzeigers (Hitzdrahtamperemeters) zur Messung von $\overset{w}{J}$ im Batteriestromkreis überflüssig ist, ergab sich einmal daraus, daß die Angaben der mit Gleichstrom zusammen geeichten Instrumente für $\bar{J}$ und $\overset{w}{J}$ nicht eindeutig merkbar voneinander abwichen; es wurde aber auch noch durch besondere Messungen an der vorgeschalteten Drosselspule D bestätigt und gleichzeitig hierbei gefunden, daß der notwendige Übergang von der Wellenspannung des Lichtbogens zu der reinen Gleichspannung der Batterie $\bar{E}_0$ tatsächlich durch die als elektrisches Gelenk wirkende Drosselspule bewerkstelligt wird, da die Wechselspannung $\tilde{E}_D$ zwischen den Enden der Drosselspule zu

$$\tilde{E}_D = \sqrt{(\overset{w}{E}_D)^2 - (\bar{E}_D)^2}$$

bestimmt, sehr nahe mit der Wechselspannung am Lichtbogen

$$\tilde{E} = \sqrt{(\overset{w}{E})^2 - (\bar{E})^2}$$

übereinstimmt. Um dies festzustellen, wurde eine eisenfreie Drosselspule mit 2010 Windungen und einem Selbstinduktionskoeffizienten von 80·0 Millihenry eingeschaltet anstelle der sonst noch weit höhere Selbstinduktion besitzenden Betriebsdrosselspule mit Eisenkern. Die Spannungsmessungen, welche zur Vorsicht an der Drosselspule auch elektrostatisch kontrolliert wurden, lieferten für $\tilde{E}$ und $\tilde{E}_D$ gegen 34 Volt, was bei einem $\omega_i = 165\,000$ in der Drosselspule eine Wechselstromstärke von nur $\frac{34}{165 \cdot 80} = 2{\cdot}6$ Milliampere liefert, die sowohl gegenüber dem beobachteten $\tilde{J} = 2{\cdot}86$ Ampere im Schwingungskreis, als wegen der geometrischen Zusammensetzung erst recht gegenüber dem Gleichstromwert $\bar{J}$ verschwindet.

An Spannungszeigern sind am Lichtbogen zur Ermittelung seiner Spannungsverhältnisse dauernd zwei eingeschaltet, ein WESTON- und ein Hitzdrahtvoltmeter; in diesem Fall ist zur Messung der Spannungen im Schwingungskreis nur noch ein umschaltbares Voltmeter (Hitzdraht- oder elektrostatisches Voltmeter) erforderlich, da an L nur reine Wechselspannung $\tilde{E}_L$ auftreten kann, während die Wellenspannung an C, d. i. $\overset{w}{E}_C$, als Gleichspannungskomponente dieselbe Spannung $\bar{E}$ enthalten muß, wie sie am Lichtbogen gemessen wurde.

Das Wattmeter wurde schließlich mit seiner Hauptstromspule in den Schwingungskreis geschaltet, weil es sich hier am günstigsten erwies, die Wechselstromleistung $\tilde{W}$, in den einzelnen Teilen des Schwingungskreises, sowie in ihrer Gesamtheit an den Abzweigstellen vom Lichtbogen direkt zu messen in der Weise, wie dies oben (**118**) näher angegeben wurde.

In allen den Fällen, wo es auch bei den Spannungsgrößen praktisch vorteilhafter erschien, die Wechselkomponente direkt zu messen und die etwa benötigten Wellenstromgrößen, ähnlich wie bei der Stromstärke, aus den beiden direkt gemessenen Komponenten zu rechnen, wurde die Schaltung, wie in Fig. 230 wiedergegeben, abgeändert: Neben der Benutzung von Kapazitäten zur Absiebung der Gleichspannungskomponenten (vgl. in **116**) wurde auch $\tilde{E}_L$ und $\tilde{E}_C$ durch besondere Voltmeter gleichzeitig gemessen, so daß die Umschaltung nur noch bei der Spannungsspule des Wattmeters erfolgte. Gleichzeitig wurde die Hauptstromspule des letzteren wegen ihres Selbstinduktionskoeffizienten, der vielfach allein in Frage kam, mit der

sonstigen Selbstinduktion L und dem überwiegenden Teil der Verbindungsdrähte mit ihrem unvermeidlichen Minimum an Selbstinduktion nebeneinander zwischen Punkt 1 und 2 geschaltet. Der Spannungsspulenkreis wurde in einigen Fällen in der näher in 121 beschriebenen Weise ausgestaltet.

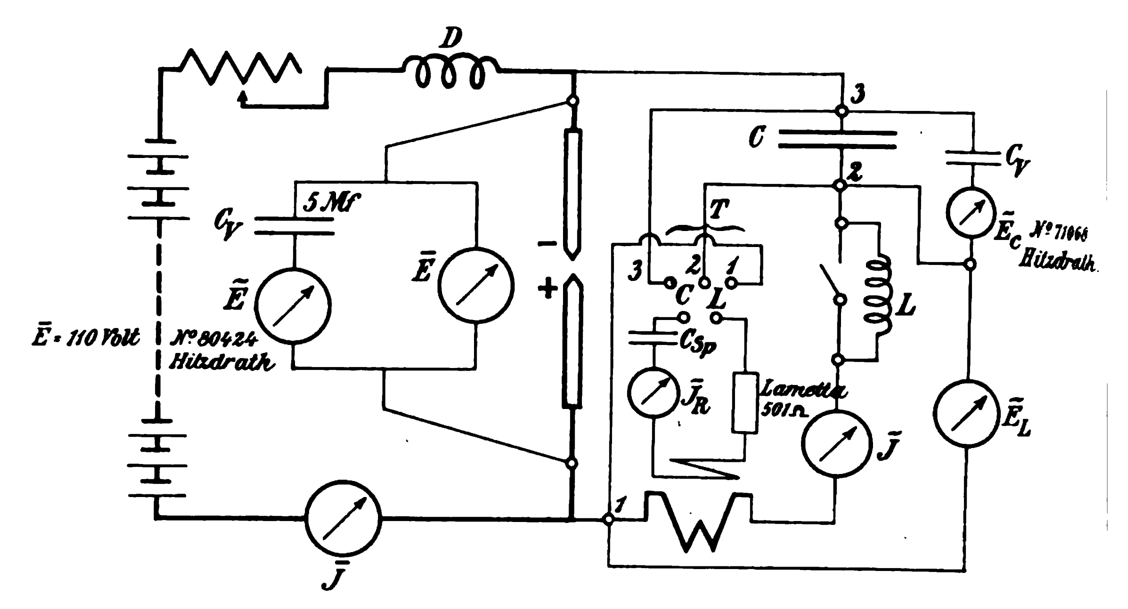


Fig. 230.

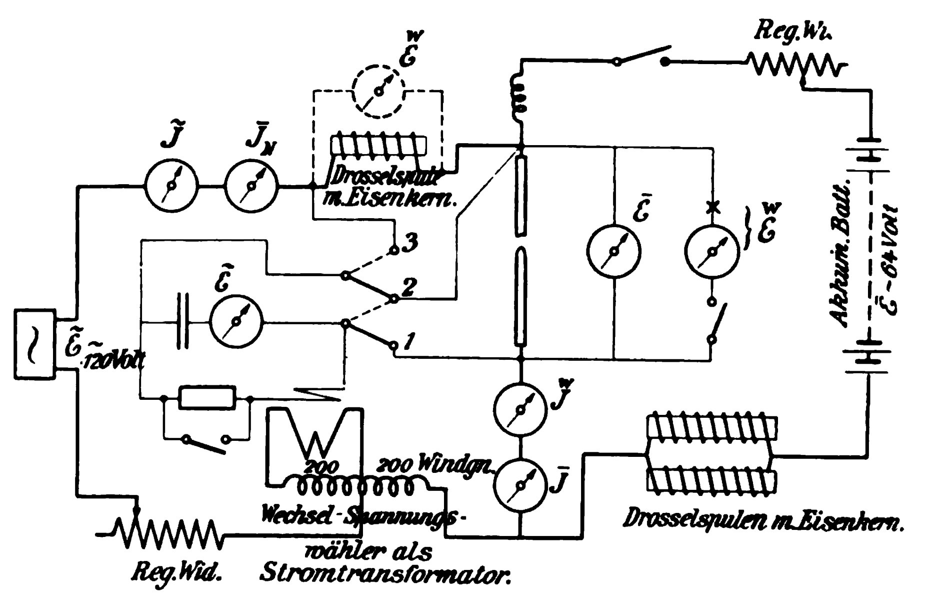


Fig. 231.

124. Schaltung bei Mischung von Gleich- und Wechselstrom. Zum Schluß möge in Fig. 231 noch eine Schaltung angeführt sein, wie sie von mir zur Untersuchung der Widerstands-, Spannungs- und Leistungsverhältnisse an Wellenstromlichtbögen (Kohlelichtbogen und Quecksilberdampflampe) mit technischen Periodenzahlen benutzt wurde, wenn

dieser Wellenstrom durch Parallelschaltung von Batteriegleichstrom und Maschinenwechselstrom im Lichtbogen erhalten wurde. Hier handelte es sich namentlich im Wechselstromkreis um Berücksichtigung bzw. Ausscheidung des Einflusses des unwillkommenen Gleichstromes, der wegen der niederen Wechselzahlen durch statische Kapazitäten (feste Kondensatoren) nicht abfiltriert werden konnte (**116**). Bei der Stromstärke ließ sich dies durch Benutzung eines WESTON-Amperemeters $\bar{J}_N$ im Wechselstromkreis neben einem die Messung von $\tilde{J}$ besorgenden Ferrariszeiger lösen. Beim Wattmeter aber, wo die Gleichstromwirkung besonders lästig wäre, blieb nur die Anwendung eines Stromtransformators für die Hauptstromspule übrig, um in dieser reinen Wechselstrom und in den Angaben des Wattmeters die reine Wechselleistung zu erhalten.

Über die Bestimmung der Periodenzahlen bei Wellenstrom wurde schon früher (**44**, **45**) das Erforderliche gesagt, da sich diese Bestimmung ja nur auf die Wechselkomponente bezieht und deren Absiebung vom Gleichstrom für Zwecke der Periodenzahlbestimmung, soweit dies überhaupt praktisch erforderlich ist, nach einer der im Vorstehenden angegebenen Methoden ohne Schwierigkeit erfolgen kann.

Magnetische Messungen.

Einleitung.

195. Stoffübersicht und Einteilung der Meßverfahren.

Als Ergänzung der im fünften Abschnitt von Band I, 2 gegebenen Ausführungen über Ferromagnetismus soll der folgende Abschnitt eine Zusammenstellung der wichtigsten Meßmethoden zur Ermittelung der magnetischen Größen bringen. Diese schließen insofern an die elektrischen Messungen der vorausgehenden Abschnitte dieses Bandes an, als die magnetische Erscheinungsseite einmal das untrennbare Gegenstück zu der elektrischen darstellt (vgl. das in Band I über Elektromagnetismus Gesagte), und als ein zweites Mal bei den magnetischen Messungen die technisch wichtigsten Methoden mit elektrischen Meßverfahren arbeiten.

Um eine gewisse Übersichtlichkeit in der Anordnung und Reihenfolge der immerhin ziemlich zahlreichen Meßverfahren auf diesem Gebiete zu erhalten, mußte eine Grundlage für die Einteilung gewählt werden.

Nach den Ausführungen in Artikel **279** und **289** des ersten Bandes über die erforderliche Neuordnung des magnetischen Wissensstoffes, sowie in **284** ff. über magnetische Hilfsvorstellungen muß folgerichtig auch die dort gewählte Anordnung als Grundlage für die Einteilung der Meßverfahren dienen. Dies ergab die 3 Hauptabteilungen: Messungen der magnetischen Ausgleichgrößen, der magnetischen Verlustgrößen und als dritten ungleich kleineren, weil technisch weniger wichtigen, Messungen des Dauermagnetismus.

Von den magnetischen Ausgleichgrößen wird die Messung der magnetischen Antriebsgröße, soweit die gesamte magnetomotorische Kraft D_0 in Frage kommt, als variables, der Messung unterworfenes Glied sich meist nur auf die Erregerstromstärke beziehen, während die Verteilung des Gefälles H gewöhnlich nur indirekt aus den Widerstandsverhältnissen g e r e c h n e t wird, und die meßtechnische Seite, d. i. die Ausbildung von Methoden zur direkten Messung der magnetischen Spannung D, kaum nennenswerte Ansätze aufweist.

Um so mannigfaltiger und ausgebildeter sind die Meßverfahren zur Bestimmung des erzielten Ausgleichs, sei es in Form der Gesamtzahl N der Kraftlinien, sei es in Form der spezifischen magnetischen Induktion oder Beanspruchung (B) eines magnetischen Mediums.

Diese im zweiten Unterabschnitt näher besprochenen Meßanordnungen

dienen im allgemeinen auch für die Feststellung des Zusammenhanges zwischen jenem N bzw. B und dem wie vorher bestimmten D bzw. H; sie bilden daher auch die Grundlage sowohl für die im dritten Unterabschnitt behandelten Methoden zur Ermittelung des Materialkoeffizienten μ bei ferromagnetischen Medien (als des wesentlichsten, aber variablen Faktors bei magnetischen Widerstandsgrößen), als auch für die Aufstellung der zweideutigen, d. h. von der magnetischen Reibung je nach der Bewegungsrichtung beeinflußten B, H-Kurven. Da die auf- und absteigenden B, H-Kurven beim Durchlaufen eines Magnetisierungszyklus in der eingeschlossenen Fläche die Hysteresearbeit und damit die wesentliche Grundlage für die Energieverluste im Eisen darstellen, so gelten jene Meßanordnungen auch in vielen Fällen zur Ermittelung dieser Verlustgrößen und stellen so gleichzeitig das Bindeglied zwischen dem ersten und zweiten Hauptabschnitt dar. Umfaßt so dessen erster Unterabschnitt die Anwendung jener Methoden und Meßapparate zur Aufstellung der sogenannten statischen Hystereseschleife von Eisenproben, so wird ein zweiter die Feststellung und Vergleichung dynamischer Schleifen und Hysteresewerte, ferner ein dritter die Ermittelung der praktisch besonders wichtigen Verlustgrößen bei technischem Wechselstrom zu behandeln haben.

Im letzten Hauptabschnitt endlich, der an Umfang und Bedeutung gegenüber den beiden ersten sehr zurücktritt, wären die Messungen zu behandeln, welche nicht auf Elektromagnete mit ihrem während der Messung bzw. des Betriebs durch elektrischen Strom erregten magnetischen Kreislauf Bezug haben, sondern auf Restmagnetismus, bzw. auf Dauermagnete. Auch hier wird es sich einerseits um die Koërzitivkraft als zurückgebliebener und gleichsam passiver Antriebsgröße handeln, andererseits um den praktisch verwertbaren Restausgleich in seinem Gesamtwert N_r bzw. seinem spezifischen Wert $\overline{B}_r$. Auch bei den hierfür anwendbaren Meßverfahren wird überwiegend nur die Benutzung der bereits im ersten Hauptabschnitt angegebenen Meßanordnungen in Frage stehen unter Anpassung derselben an die hier vorliegenden Verhältnisse.

Die weitere Anordnung und Einteilung in den einzelnen Unterabschnitten bedarf in den meisten Fällen keiner besonderen Erläuterungen und dort, wo die Mannigfaltigkeit der Methoden eine Erklärung ihrer Wahl wünschenswert erscheinen läßt, ist diese an den Anfang der einzelnen Unterabschnitte gestellt, wie bei den Methoden zur Messung der Kraftlinienfelder.

Die Reihenfolge der Behandlung ist auch in diesem Abschnitt so gewählt worden, daß zuerst die absoluten Methoden besprochen werden, welche die Messung durch Zurückführung auf Größen von anderer Dimension als die gesuchte Größe ausführen, hieran anschließend die vergleichenden Methoden.

A. Magnetische Ausgleichgrößen.

I. Ermittelung der magnetischen Antriebsgröße.

126. Unterschied zwischen elektrischen und magnetischen Meßverhältnissen.

In den Artikeln 290 und 291 des ersten Bandes ist zum besseren Verständnis der magnetischen Verhältnisse ein Vergleich zwischen diesen und den geläufigeren elektrischen Verhältnissen herangezogen. Denkt man sich diesen Vergleich auch auf die meßtechnische Seite ausgedehnt, so springt

folgende Tatsache als die auffallendste in die Augen: Von den einander entsprechenden Kreislaufgrößen fehlt es der der elektrischen Stromstärke zugeordneten magnetischen Ausgleichstärke in keiner Weise an Methoden und Apparaten, welche zur Messung geeignet sind und verwendet werden (siehe im folgenden Unterabschnitt II). Um so größer ist der Unterschied zwischen elektrischen und magnetischen Meßmöglichkeiten bei der anderen Ausgleichgröße, d. i. der der elektrischen Spannung entsprechenden magnetischen Antriebsgröße, welche entweder als wirksamer Antrieb (Fallhöhe) D zwischen zwei Kreislaufquerschnitten unmittelbar den bei elektrischen Messungen benutzten Spannungswerten entspricht, oder als spezifische Größe (magnetisches Gefälle H) einem elektrisch weniger benutzten Spannungsgefälle E_1 (auf die Längeneinheit der Stromlinie bezogen) zu vergleichen wäre. Während nämlich für die experimentelle Ermittelung oder Messung elektrischer Spannungsgrößen Methoden und Instrumente in Fülle zur Verfügung stehen, sind entsprechende Meßvorrichtungen auf magnetischem Gebiet überhaupt nicht vorhanden, was, abgesehen von dem Zusammenschrumpfen dieses Unterabschnittes I, auf die ganze Ausbildung der magnetischen Meßtechnik gegenüber der elektrischen einen tiefgreifenden Einfluß ausübt. Hierdurch wird nämlich ein mehr indirektes Vorgehen der magnetischen Messungen notwendig und dieses wird eine weniger große Eindeutigkeit bzw. Zuverlässigkeit ihrer Ergebnisse zur Folge haben. Eine weitere Verstärkung wird diese Unsicherheit gegenüber den elektrischen Messungen noch durch die neu hinzutretenden erschwerenden Momente, wie Streuung und magnetische Molekularreibung erfahren (vgl. Bd. I, 2 in **290**).

Bei der Ermittelung der magnetischen Antriebsgröße wird ein indirektes Verfahren insofern Platz greifen müssen, als die für die Auswertung meist erforderliche „magnetische Teilspannung" mangels einer direkten Messung stets aus dem allein meßtechnisch zugänglichen Gesamtwert D der im ganzen magnetischen Kreislauf wirksamen *MMK* rechnerisch oder graphisch abgeleitet werden muß. Die M e s s u n g von D wird sich also in allen Fällen darauf beschränken, daß die durch Zählung bestimmte, oder von vornherein bekannte Windungszahl w der Erregerspule mit der durch ein Amperemeter gemessenen Erregerstromstärke J multipliziert wird, um die technischen Einheiten der wirksamen MMK in Amperewindungen, oder durch Hinzufügung des Maßsystemfaktors $\frac{4\pi}{10}$ in $1{\cdot}257\, J \cdot w$ die CGS-Einheiten zu erhalten.

Zu beachten wäre hierbei nur, daß als Magnetisierungsstromstärke J nur bei Gleichstrom der volle mit dem Amperemeter gemessene Wert $\tilde{J}$ einzusetzen ist, während bei Wechselstrom nur die Sinuskomponente $\tilde{J} \cdot \sin\varphi$ eintritt, so daß hier zur Bestimmung von $\sin\varphi$ noch außer dem Amperemeter ein Wechselstromvoltmeter zur Messung von $\tilde{E}$ und ein Wattmeter zur Messung der umgesetzten Watt W nach der früher (Fig. 134 in **63**) angegebenen Schaltung notwendig wird. Nach Anbringung der erforderlichen Korrektionen erhält man so das $\cos\varphi$ der Stromstärke $\tilde{J}$ gegenüber der Umsetzungsspannung $\tilde{E}_i$ und damit auch das jenem $\cos\varphi$ entsprechende $\sin\varphi$.

In den besonderen Fällen, in welchen das Benutzen von Mittelwerten sowie von äquivalenten Phasenverschiebungen nicht zulässig erscheint, sondern auf die Momentan- bzw. Maximalwerte eingegangen werden soll oder muß, erfordert die Ermittelung dieser Erregerstromwerte noch eine weitere Vervollständigung der Meßmittel, namentlich die Aufnahme des Verlaufs der Stromkurve (vgl. **53**).

sowie nötigenfalls hieran anschließend ihre Zerlegung, wie sie ausführlicher in **301** und **306** von Band I, 2 behandelt ist.

In den weitaus meisten Fällen, namentlich bei technischen Messungen, wird man aber auch bei Wechselstrom von den in einfacher Weise bestimmten Windungsampere als der grundlegenden *MMK* ausgehen.

Dieser magnetische Gesamtantrieb D wird nun nach den magnetischen Kreislaufgesetzen längs jeder geschlossenen Kraftlinie entsprechend den magnetischen Widerständen verteilt, wie dies eingehender in **291** von Band I, 2 behandelt wurde. Diese magnetischen Teilwiderstände werden aber auch nicht durch unmittelbare Messungen erhalten, wozu eben die Messung magnetischer Teilspannungen als wesentliche Voraussetzung gehören würde, sondern die Teilung des aus $S_m = D : N$ folgenden Gesamtwiderstandes wird gewöhnlich auf Grund einer Zerlegung vorgenommen, die nur die Ausmessung der Dimensionen zu Grunde legt, im übrigen aber rechnerisch bzw. konstruktiv verfährt.

Verlaufen die Kraftlinien aber nicht in homogenem Material von gleichbleibendem Querschnitt, sondern durchsetzen sie, wie in der Mehrzahl der Fälle, teils Eisen teils Luft, so ist die Verteilung oder Zerlegung von $D = D' + D''$ nur in einer beschränkten Anzahl von Fällen mit ausreichender Zuverlässigkeit möglich, so bei längeren stabförmigen Eisenproben in unmagnetischer Umgebung mit Hilfe der Entmagnetisierungsfaktoren (vgl. Bd. I, 2 in **291**) und allenfalls noch bei Toroiden oder ähnlichen Kreislaufanordnungen mit verhältnismäßig kurzen planparallelen Luftschlitzen von genau ausgemessenen Dimensionen (vgl. Bd. I, 2 in **292**). In allen anderen Fällen ist jene mehr rechnerische Zerlegung von D mit Hilfe der Scherung bzw. Scherungslinie nur innerhalb beschränkter Gebiete und mit geringerer Zuverlässigkeit durchführbar, so daß die für die Zerlegung von D erforderliche Scherungslinie auf experimentellem Wege, meist durch Zurückführung auf einen der vorgenannten Fälle erfolgen muß.

127. **Experimentelle Bestimmung der Scherung.**

Eine messende oder experimentelle Ermittelung der Scherungslinie ist einmal für alle Fugen oder Luftschlitze mit nicht genauer bestimmbaren Dimensionen erforderlich, ein zweites Mal auch bei ausmeßbaren Luftschlitzen für hohe Sättigungsgrade oder magnetische Beanspruchungen, bei denen die Streuungsverhältnisse eine erhebliche Änderung erfahren. Diese sehr schwierigen Untersuchungen müssen für jede Kreislaufanordnung gesondert ausgeführt werden und sind z. B. für eine Reihe von Apparaten, welche die Untersuchung gerader Eisenstäbe in mehr oder weniger geschlossenen Jochausführungen zum Ziel haben, von der Phys. Techn. Reichsanstalt durch gleichzeitige Untersuchung jener in Form von Rotationsellipsoiden abgedrehten Stäbe nach der Magnetometermethode (**132**) durchgeführt worden, so für den Apparat von Siemens & Halske (**138**), für die magnetische Wage von Du Bois (**140**) und für bestimmte Joche zur Messung nach der Induktionsmethode (**146**). Diese Zurückführung auf rechnerisch besser zugängliche Meßmethoden wird aber für die gewöhnlichen Fälle der Meßtechnik im allgemeinen nicht in Frage kommen, da ihre Durchführung zu viele Schwierigkeiten bietet. Man wird also in den besagten Fällen meist vorziehen, übereinstimmend ausgeführte Apparate und die durch jene Untersuchungen aufgestellten Scherungslinien, wie sie jenen Apparaten beigegeben werden, als ausreichend zuverlässig für die Verteilung von D zu benutzen.

Eine Möglichkeit, den Scherungswert bzw. die Zerlegung von D bei

folgende Tatsache als die auffallendste in die Augen: Von den ei
entsprechenden Kreislaufgrößen fehlt es der der elektrischen Stromstä
geordneten magnetischen Ausgleichstärke in keiner Weise an Metho
Apparaten, welche zur Messung geeignet sind und verwendet werd
im folgenden Unterabschnitt II). Um so größer ist der Unterschied
elektrischen und magnetischen Meßmöglichkeiten bei der anderen A
größe, d. i. der der elektrischen Spannung entsprechenden ma
Antriebsgröße, welche entweder als wirksamer Antrieb (Fallhöhe) I
zwei Kreislaufquerschnitten unmittelbar den bei elektrischen Me
nutzten Spannungswerten entspricht, oder als spezifische Größe (n
Gefälle H) einem elektrisch weniger benutzten Spannungsgefäll
Längeneinheit der Stromlinie bezogen) zu vergleichen wäre. W
lich für die experimentelle Ermittelung oder Messung elektrisch
größen Methoden und Instrumente in Fülle zur Verfügung ste
sprechende Meßvorrichtungen auf magnetischem Gebiet üb
vorhanden, was, abgesehen von dem Zusammenschrumpfen
abschnittes I, auf die ganze Ausbildung der magnetischen Me
über der elektrischen einen tiefgreifenden Einfluß ausübt.
nämlich ein mehr indirektes Vorgehen der magnetischen Mess
und dieses wird eine weniger große Eindeutigkeit bzw. Zuv
Ergebnisse zur Folge haben. Eine weitere Verstärkung
sicherheit gegenüber den elektrischen Messungen noch dur
tretenden erschwerenden Momente, wie Streuung und magn
reibung erfahren (vgl. Bd. I, 2 in **290**).

Bei der Ermittelung der magnetischen Antriebsgröße v
Verfahren insofern Platz greifen müssen, als die für di
erforderliche „magnetische Teilspannung" mangels eine
stets aus dem allein meßtechnisch zugänglichen Gesamtw
magnetischen Kreislauf wirksamen MMK rechnerisch o
leitet werden muß. Die Messung von D wird sich
darauf beschränken, daß die durch Zählung bestimmte
bekannte Windungszahl w der Erregerspule mit der d
gemessenen Erregerstromstärke J multipliziert wird, u
heiten der wirksamen MMK in Amperewindungen,
des Maßsystemfaktors $\frac{4\pi}{10}$ in $1{\cdot}257\, J \cdot w$ die CGS-Ein

Zu beachten wäre hierbei nur, daß als Magneti
bei Gleichstrom der volle mit dem Amperemeter gem
ist, während bei Wechselstrom nur die Sinusko
so daß hier zur Bestimmung von $\sin\varphi$ noch auß
Wechselstromvoltmeter zur Messung von $\tilde{E}$ und e
der umgesetzten Watt W nach der früher (Fig. 134 i
notwendig wird. Nach Anbringung der erford
man so das $\cos\varphi$ der Stromstärke $\tilde{J}$ gegenüber
und damit auch das jenem $\cos\varphi$ entsprechende

In den besonderen Fällen, in welchen das Be
von äquivalenten Phasenverschiebungen nicht z
die Momentan- bzw. Maximalwerte eingegangen w
die Ermittelung dieser Erregerstromwerte noch
der Meßmittel, namentlich die Aufnahme des Ve

vorliegenden stabförmigen Eisenproben selbst zu bestimmen, bietet noch ein von EWING angegebenes Verfahren durch Differenzmessung. Dieses Vorgehen besitzt namentlich für Normalstäbe, die später zu vergleichenden Messungen dienen sollen, eine gewisse Bedeutung, falls man genügende magnetische Homogenität längs des Stabes voraussetzen darf; dieselbe Meßanordnung kann auch zu einer Differenzmessung benutzt werden, die eine Analogie auf elektrischem Gebiet besitzt in der Methode zur Messung von Flüssigkeitswiderständen mit Gleichstrom unter Eliminierung der fälschenden Polarisationserscheinungen an der Übergangsstelle von der Elektrode in die Flüssigkeit (**9**). Um den durch die Fugen benötigten Betrag D'' von $D = 1{\cdot}257\, J \cdot w$ empirisch auszuscheiden, kann man wie folgt verfahren: Zwei möglichst gleiche und homogene Probestücke werden, wie Fig. 232 zeigt, nahe ihren Enden durch eiserne Joche verbunden. Beide Stäbe werden mit Magnetisierungs- und Induktionswickelung versehen und die B, D-Kurve nach der Induktionsmethode (siehe **147**) ermittelt. Jetzt

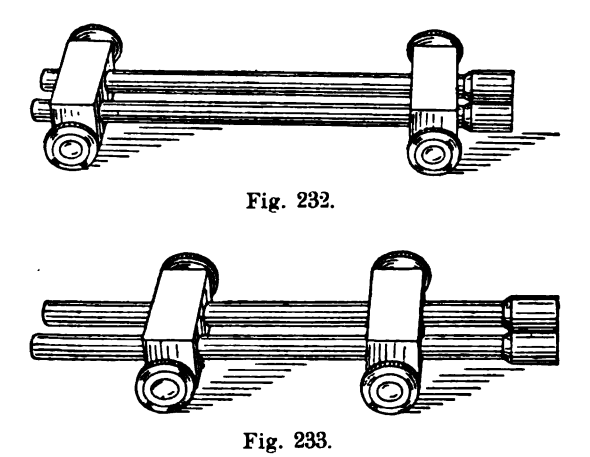


Fig. 232.

Fig. 233.

werden bei einer zweiten entsprechenden Messung die Joche so zusammengeschoben, daß sie, wie Fig. 233 andeutet, etwa die halbe Länge der Stäbe zwischen sich lassen und wiederum die B, D-Kurve ermittelt. Trägt man beide Kurven in dasselbe Koordinatensystem ein, so wird die Differenz D' der D-Werte zu demselben B-Wert den Nettobetrag des magnetischen Antriebes darstellen, der auf die ausgeschaltete Länge l' der Stäbe entfällt, so daß $\frac{D'}{l'}$ das Nettogefälle H' pro Längeneinheit des Stabes liefert und die Ableitung der B, H-Kurve ohne weiteres gestattet.

EWING verfährt, um die Größe des Scherungsbetrages D'' bzw. des Gefälles im Luftschlitz H'' zu ermitteln, bei gleicher Meßanordnung in folgender Weise: Bei der vollen Länge l der Probestäbe wird mit einer bestimmten Anzahl Windungen erregt, so daß der gesamte Antrieb D_1 bezogen auf die Länge l durch die Gleichung

$$D_1 = D_1' + D_1''$$

gegeben ist, wenn zur Überwindung des magnetischen Widerstandes der Eisenstäbe D_1' und der Luftschlitze (einschließlich Joche) D_1'' erforderlich ist. Bei Division durch die Länge l folgt als Verteilung des Gefälles H

$$H_1 = H_1' + H_2'' \quad \text{oder} \quad H_1' = H_1 - H_1''$$

Wird bei Reduktion der Länge l auf $\frac{l}{2}$ (Fig. 233) auch in genau gleichem Verhältnis die Windungszahl verkleinert, so daß für dieselbe Erregerstromstärke $\bar{J}$ auch D_2 im gleichen Verhältnis kleiner wird, also hier $D_2 = \frac{D_1}{2}$, so folgt $\left(D_2 : \frac{l}{2}\right) = D_1$. Hier muß aber die Verteilung des Gefälles eine andere werden, nämlich, da für gleiches B und gleiche Art der Einklemmung, d. h. bei gleichen Übergangswiderständen auch $D_2'' = D_1''$ sein muß,

$$\frac{D_2}{\left(\frac{l}{2}\right)} = \frac{D_2'}{\left(\frac{l}{2}\right)} + \frac{D_2''}{\left(\frac{l}{2}\right)} \quad \text{oder } H_2' = H_1 - 2\,H_1''.$$

Die Differenz beider Gleichungen liefert

$$H_1' - H_2' = H_1''.$$

Trägt man also die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen in dasselbe Koordinatensystem ein, welches als Abszissen die Erregerstromstärken, als

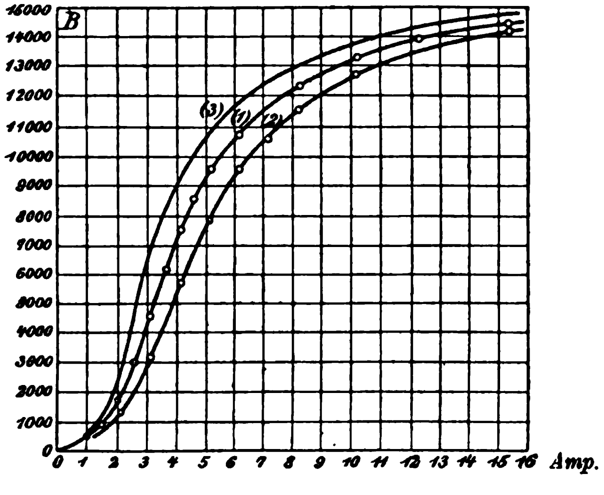


Fig. 234.

Ordinaten die B-Werte enthält, so wird etwa bei voller Länge die Kurve 1 (Fig. 234) und bei halber Länge die Kurve 2 erhalten werden. Da nun die Abszissendifferenzen beider dem durch die Luftfugen (einschließlich Joche) verbrauchten Gefälle entsprechen, so liefern die Differenzen von 1 und 2 unmittelbar durch Abtragen von der Ordinatenachse die Scherungslinie; weiterhin liefert die Kurve 3, welche gegenüber 1 um den gleichen Betrag rückwärts geschert ist wie 2 vorwärts, die gesuchte Reinkurve.

128. Gefällbestimmung aus Kreislaufgesetz. Gefälle des Erdfeldes.

Ist der Wert für den Gesamtwert D der in einem Kreislauf wirkenden *MMK* nicht bekannt, so bleibt im allgemeinen für die Bestimmung einer gesuchten Teilspannung D_x nur die Möglichkeit einer Berechnung aus den beiden für sich ermittelten Werten von N_x und von $S_x = \frac{l_x}{q_x \cdot \mu_x}$. Diese Bestimmung wird namentlich für unmagnetische Raumstrecken mit $\mu_x = 1$ in Frage kommen, da hierfür eine Ausmessung der Dimensionen l_x und q_x, sowie eine Bestimmung

von N_x nach einer der Methoden von Abschnitt II genügt. In diesem Falle folgt auch aus $D_x = N_x \cdot \frac{l_x}{q_x}$ ohne weiteres das magnetische Gefälle $H_x = B_x$, und bei einer unmittelbaren Bestimmung von B_x kommt die Bestimmung der Dimensionen l_x und q_x ganz in Fortfall.

In dem besonderen Falle, daß das magnetische Gefälle H auf größere Raumstrecken konstant bleibt, wie dies z. B. im Erdfelde der Fall ist, kann die Ermittelung von H auch mit Hilfe einer leicht beweglichen möglichst kurzen Magnetnadel (Magnetometer), etwa einem älteren Spulengalvanometer nach Entfernung der Spulen, erfolgen. Diese Bestimmung des magnetischen Gefälles H_e in der Erdatmosphäre, oder einer bestimmten Komponente desselben, meist der Horizontalkomponente H_h, kann sowohl unter Zuhilfenahme eines Dauermagneten nach Gauss erfolgen, oder unter Benutzung eines genau berechenbaren Stromfeldes als Ablenkungsfaktor nach W. Weber. Die letztere Methode mit Benutzung einer sogenannten absoluten Bussole (Tangentenbussole nach Weber, Gaugain oder Helmholtz) dürfte für praktische Zwecke, etwa Bestimmung des magnetischen Gefälles H_h an einer bestimmten Stelle eines Laboratoriumsraumes oder Maschinenhauses, wohl die größere Wichtigkeit besitzen.

Es sei zunächst die von Gauss angegebene Methode zur Ermittelung der von der Erde als Magnet (vermutlich Elektromagnet, vgl. I, 1 in 18 u. 96) erzeugten Feldintensität in ihrer Horizontalkomponente mit Hilfe des Magnetometers angeführt.

Die Messung von H_h erfolgt unter Zuhilfenahme eines stabförmigen Dauermagneten (M), dessen Magnetismus während der Versuchsdauer als konstant vorausgesetzt wird, im übrigen aber nicht bekannt zu sein braucht. Läßt man auf die kleine Magnetnadel m des Magnetometers (Fig. 235), welche sich in den magnetischen Meridian $N \ldots . S$ einstellt, den genau in die Mittelsenkrechte von m orientierten Dauermagnet mit dem magnetischen Moment M einwirken, so erfährt m eine direkt — oder vorteilhafter bei größeren Werten von d mit Spiegel und Skala — meßbare Winkelablenkung α.

Ist der Abstand zwischen den Mitten von m und M d_1 cm und ist α_1 das Mittel aus den beiden Ablenkungen, einmal bei westlicher Lage von M, ein andermal bei östlicher Lage von M, hingegen α_2 bei der Entfernung d_2 cm, so folgt aus dem Gesetz von Coulomb für das Verhältnis von M zu H_h

$$M : H_h = \frac{1}{2} \frac{d_1^5 \operatorname{tg} \alpha_1 - d_2^5 \operatorname{tg} \alpha_2}{d_1^2 - d_2^2} = Q.$$

Um M ausscheiden zu können, muß jetzt noch eine weitere Bestimmung mit dem Dauermagneten ausgeführt werden, indem man ihn an einer Aufhängevorrichtung mit bekanntem, im übrigen aber möglichst kleinem, wenn nicht vernachlässigbarem Torsionsverhältnis D in dem zu bestimmenden Feld mit der Horizontalkomponente H_h schwingen läßt. Bezeichnet man die hierbei beobachtete Schwingungsdauer (auf unendlich kleine Bögen reduziert) mit τ und das aus den Dimensionen des Stabmagneten bestimmte Trägheitsmoment mit T, so folgt aus den Schwingungsgleichungen

$$M \cdot H_h = \frac{\pi^2 \cdot T}{\tau^2 (1 + D)} = P.$$

Aus diesen beiden Werten, d. i. Produkt P oder $M \cdot H_h$ und Quotient Q oder $M : H_h$, folgt alsdann

$$H_h = \sqrt{P : Q}.$$

Anstelle der leicht unbequemen Meßanordnung nach Fig. 235, d. h. eines Magnetometers nach GAUSS unter Benutzung eines Dauermagneten als Ablenkungsfaktor, wird man bei dem heutigen Stande der elektrischen Meßtechnik mit ihrer leicht ausführbaren Stromstärkemessung und bei den vielfach starken Änderungen von H_h innerhalb kleiner Entfernungen meist ein Magnetometer in Gestalt einer absoluten Bussole vorziehen (vgl. Bd. II, 1 in **22** und **45** ff.). Wird die Stromstärke $\bar{J}$, welche das ablenkende Stromfeld erzeugt, in Ampere gemessen, wobei nur darauf zu achten ist, daß das Meßinstrument mit seinem Streufeld (Drehspuleninstrument) keine merkliche Beeinflussung von H_h bewirkt, ferner die Windungszahl w und ihr mittlerer Durchmesser d in cm bestimmt, so ist das magnetische Gefälle $\bar{H}_i$, welches die stromdurchflossene Wickelung erzeugt in der Mitte der Spule (WEBERS Bussole)

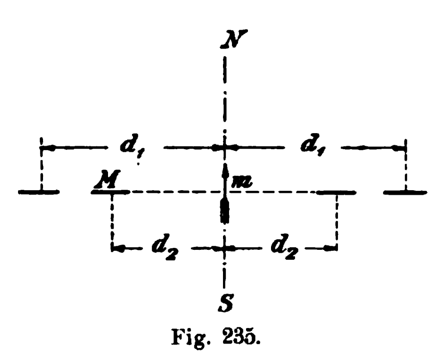


Fig. 235.

$$\bar{H}_i = \frac{4\pi w \cdot \bar{J}}{10 \cdot d},$$

während bei GAUGAIN die Gefällkomponente in Richtung der Horizontalebene

$$\bar{H}_i = \frac{1{\cdot}43\,\pi \cdot w}{10 \cdot d} \cdot \bar{J}.$$

In beiden Fällen ist auch hier die durch das Stromfeld hervorgerufene Ablenkung α aus dem magnetischen Meridian und der Windungsebene gegeben durch

$$\operatorname{tg} \alpha = \bar{H}_i : \bar{H}_h \qquad \text{also}$$

$$H_h = \bar{H}_i : \operatorname{tg} \alpha = \frac{4\pi \cdot w \cdot \bar{J}}{10 \cdot d \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad \text{bzw.} \quad \frac{1{\cdot}43 \cdot \pi \cdot w \cdot \bar{J}}{10 \cdot d \cdot \operatorname{tg} \alpha}.$$

Über Korrektionen, welche genauere Messungen wegen der Nadeldimensionen zu erfahren haben, siehe Bd. II, 1 in **48**, doch werden die Werte, welche die obigen Formeln liefern, mit Rücksicht auf die zeitlichen Schwankungen von H_h wohl in den meisten Fällen der elektrotechnischen Praxis ausreichen.

Die Vergleichung zweier magnetischer Gefälle H_1 und H_2 an verschiedenen Stellen des Luftraumes wird unter der Voraussetzung, daß die räumliche Änderung eine langsam veränderliche Koordinate gegenüber der Länge der benutzten Magnetnadel darstellt, einfach durch Beobachtung der Schwingungsdauer τ_1 und τ_2 derselben Magnetnadel an den beiden zu vergleichenden Stellen in derselben Lage bzw. Richtung gegenüber der Richtung des Gefälles bestimmt zu

$$H_1 : H_2 = \tau_2^2 : \tau_1^2.$$

II. Ermittelung des erzielten magnetischen Ausgleichs.

1. Zusammenstellung der verschiedenen Meßmöglichkeiten.

129. Übersicht und Einteilung der Methoden.

Die räumliche Feldverteilung bei einem magnetischen Kreislauf mit teilweisem oder auch völligem Verlauf der magnetischen Kraftlinien (Induktionslinien vgl. I, 2 in **179**) in Luft läßt sich zunächst mehr qualitativ in ihrer Gesamtheit durch Eisenfeilichtbilder anschaulich machen und im Einzelnen (Differentialverfahren) aus der Lage eines kleinen, freibeweglichen Magneten entnehmen. So wertvoll auch namentlich das zuerst angeführte Integralverfahren für Demonstrationszwecke ist, weil es in seiner Anschaulichkeit die Vorstellungen des Anfängers und zuweilen auch des Forschers (vgl. in I, 2 die Untersuchungen über das Drehfeld mit den Figuren in **185**, sowie weiterhin die Fig. 166, 168 und 189 in **181**) wirksam zu unterstützen vermag, so läßt diese Methode, den Ausgleich festzustellen, doch keine quantitative Bestimmung, d. h. keine eigentliche Messung zu.

Die Methoden zur Messung des Ausgleichs lassen sich zunächst in zwei Hauptgruppen einteilen, die man kurzweg als die mechanischen und die elektrischen bezeichnen könnte. Als mechanische Methoden sind hierbei solche bezeichnet, bei denen die Grundlage der Messung von der mechanischen Antriebskraft gebildet wird, die aus dem energetischen Fallbestreben (I, 2 in **180**, **298**) des beweglichen Systems der Meßanordnung hervorgeht. Diese Gruppe umfaßt alle Magnetometermethoden, ferner die Elektromotormethoden und endlich die Zugkraftsmethoden. Als elektrische Methoden sind solche bezeichnet, bei denen die magnetische Feldwirkung, die zur Messung herangezogen wird, sich in der Änderung oder Hervorrufung einer elektrischen Größe bzw. Kraft äußert. Diese Gruppe würde also neben den Methoden, welche die Änderung des elektrischen Widerstandes von Wismutdrähten zur Messung benutzen, namentlich alle (magnetoelektrischen) Induktionsmethoden umfassen, die in mannigfacher Weise zur Messung der magnetischen Feldwerte Anwendung gefunden haben und die praktisch wichtigsten Verfahren zur Ermittelung dieser Größen darstellen. Der Grund für die letztgenannte Tatsache ist einmal in den Vorteilen zu suchen, welche die Überführung der Messung auf das elektrische Gebiet mit seinen zuverlässig meßbaren Größen einschließt (vgl. in **86**), ein zweites Mal aber auch in der Möglichkeit, die Meßergebnisse leichter frei von Störungseinflüssen zu halten, als bei den Methoden der anderen Gruppe.

Auch nach einem anderen Gesichtspunkt könnte man die vorgenannten Methoden in Gruppen teilen, wobei alsdann alle Induktionsmethoden als die eine Gruppe allen vorgenannten Methoden als der anderen gegenübertreten würden. Während bei den Induktionsmethoden nämlich in erster Linie stets eine Kraftlinienzahl N aus der Messung hervorgeht und aus dieser durch Division mit dem Feldquerschnitt q eine mittlere spezifische magnetische Beanspruchung (Induktion) $(B)_m$ abgeleitet wird, enthält die Grundgleichung bei allen übrigen Methoden diesen Faktor B oder die Felddichte als Bestimmungsgröße, nach welcher die Auflösung erfolgt, und die gesamte Kraftlinienzahl N wird erst aus der gemessenen Größe B abgeleitet und zwar, abgesehen von den Magnetometermethoden, in der Regel durch Multiplikation mit dem Feldquerschnitt q.

In beiden Fällen wird stillschweigend bei der Rechnungsoperation

hinreichende Homogenität des Feldes innerhalb des in Betracht gezogenen Querschnittes vorausgesetzt, oder bewußt mit einem mittleren Wert $(B)_m$ gerechnet. Soll bei einem nicht homogenen Felde die Verteilung von B bzw. N topographisch festgestellt werden, so müssen die Prüfquerschnitte ausreichend klein gewählt werden, damit das gemessene $(B)_m$ nicht zu stark verschieden ausfällt von den B-Werten der einzelnen Punkte im Prüfquerschnitt.

130. **Physikalische Meßmöglichkeiten.**

Nicht unerwähnt möge bleiben, daß neben den hier angeführten Methoden, welche die Grundlage von technisch mehr oder weniger wichtigen Meßanordnungen bilden, noch eine Anzahl rein physikalischer Meßmöglichkeiten der magnetischen Induktion bestehen, die noch nicht zur Ausbildung technischer Methoden die Veranlassung gegeben haben. Genannt seien als solche, zu Meßzwecken ausbildungsfähige Wirkungen des magnetischen Feldes (vgl. hierzu Hdb. I, 2 in **270** bis **281**):

1. Die Verdrängung stärker diamagnetischer Medien durch stärker paramagnetische in starken magnetischen Feldern; von QUINCKE (vgl. 1885 Wied. Ann. 24, 374) zur Ausbildung der sogenannten Steighöhenmethode benutzt.

2. Die elektrodynamische Wirkung des Magnetfeldes (B) auf stromdurchflossenes Quecksilber ($\bar{J}$) und Benutzung dieses Antriebes zur Erzeugung eines mit B proportionalen Überdruckes in anschließenden kommunizierenden Röhren. Die Umkehrung eines von LIPPMANN (1884 Compt. Rend. 98, 1256) angegebenen, hierauf beruhenden Galvanometers in ein Meßinstrument zur Bestimmung von B bei konstantem $\bar{J}$ ist von LEDUC (1887, Journal de physique 6, 184) erfolgt und von DU BOIS (1888 Wied. Ann. 35, 142) etwas weiter ausgebildet worden.

3. Das HALLsche Phänomen der Verdrehung der Niveaulinien des elektrischen Potentiales durch das magnetische Feld um einen mit B angenähert proportionalen Winkel β, dessen Messung zu $e_1 - e_2$ durch ein empfindliches Galvanometer G erfolgen kann, wie Fig. 236 andeutet (vgl. hierzu das Weitere Hdb. I, 2 in **273**).

An magnetooptischen Methoden treten noch hinzu:

4. Das KERRsche Phänomen der Drehung der Polarisationsebene bei Reflexion polarisierten Lichtes an stark magnetisierten Oberflächen. Gleichfalls von DU BOIS (1890 Wied. Ann. 39, 25 und M. Kr. Seite 362) zu einer Meßanordnung ausgebildet.

5. Das KUNDTsche Phänomen der Drehung der Polarisationsebene beim senkrechten Durchgang des Lichtes durch transversalmagnetisierte, dünne, durchsichtige, ferromagnetische Schichten (1884 Wied. Ann. 23, 228, oder auch DU BOIS M. Kr. Seite 363).

Von diesen 5 Methoden zur Messung von B wären 1 und 2 der Gruppe 1 anzureihen hingegen 3, sowie in gewissem Sinne auch 4 und 5, der Gruppe 2.

131. **Sichtung nach der Störungsfreiheit.**

Vom Standpunkt der praktischen Verwendung wird je nach dem Grade der Störungsfreiheit durch andere oder Fremdfelder zu unterscheiden sein in Methoden mit mehr oder weniger offenen Kreislaufanordnungen, d. h. solchen mit längerem oder mit kürzerem Verlauf der Kraftlinien in Luft zwischen dem Ende der zu untersuchenden Eisenprobe und dem für die Messung des Ausgleichs wirksamen Teil der Meßanordnung. Nach dieser Richtung liegen die Verhältnisse weitaus am ungünstigsten bei den Magnetometermethoden, welche deshalb für Zwecke der elektrotechnischen Praxis bei absoluten Messungen kaum noch Verwendung finden, hingegen noch in einzelnen Fällen bei Vergleichsmethoden.

$$H_x = \frac{q \cdot I}{d_1^{\,2}} - \left(\frac{q \cdot I}{d_2^{\,2}}\right)\frac{d_1}{d_2} = \frac{q \cdot I}{d_1^{\,2}}\left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3\right] \qquad \text{oder}$$

$$I = \frac{H_x \cdot d_1^{\,2}}{q\left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3\right]} = \frac{H_h \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot d_1^{\,2}}{q\left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3\right]}.$$

Abgesehen von dem, auch von Ewing bei seinen Untersuchungen (a. a. O. § 37 bis 50) sehr unangenehm empfundenen „Kriechen" der Magnetometernadel infolge von magnetischen Nachwirkungserscheinungen (I. 2 in 294) sind noch folgende Fehlerquellen zu beachten und durch eine geeignete Meßanordnung nach Möglichkeit zu beseitigen:

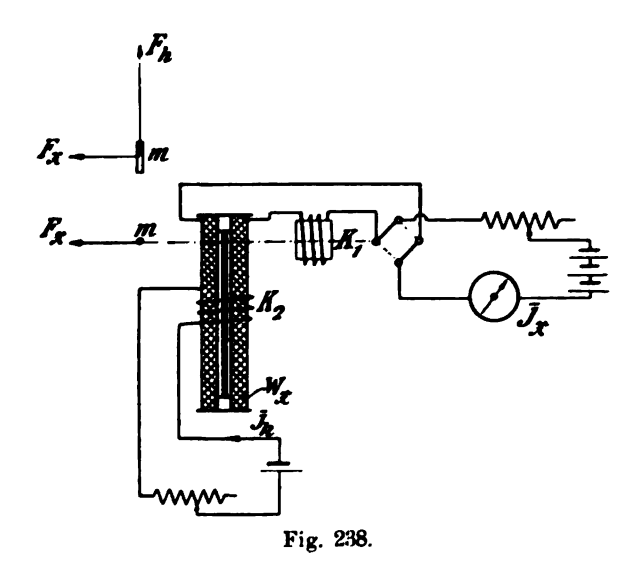


Fig. 238.

Nach den Ausführungen in Bd. I, 2 (**292**) ist die stets zur Messung gelangende Magnetisierungsintensität oder Polstärke I mit der magnetischen Induktion B und dem Gefäll H_0 durch die Gleichung verbunden

$$4\pi I = B_f = B - H_0.$$

Um die Magnetisierungswirkung B_f der zu untersuchenden ferromagnetischen Probe zu erhalten, muß also die von der Magnetisierungsspule selbst herrührende Antriebswirkung (H_0) durch eine Spule kompensiert werden. Um diese Kompensation möglichst für alle Stromstärken zu erhalten, muß diese Kompensationsspule K_1 (vgl. Fig. 238) vom Magnetisierungsstrom durchflossen werden. Man muß nun vor Einbringung des Eisendrahtes x bei der in Fig. 238 angegebenen Schaltung die Spule K_1, welche mit ihrer Achse in der Richtung von H_x angeordnet und meist aus ein paar Windungen mit großem Durchmesser gebildet wird, so lange verschieben, bis keine Stromstärke J_x einen Ausschlag am Magnetometer herbeiführt. Diese Abgleichung ist aber außerordentlich mühsam und hat selten vollständigen Erfolg, so daß doch eine Korrektionstabelle oder besser -kurve für die verschiedenen Stromstärken erforderlich wird. Immerhin hat man die Annehmlichkeit, daß diese Korrektionen sehr viel kleiner sind als ohne Kompensation. Dies wird namentlich auch für den Fall gelten, daß man bei der notwendigen Prüfung

wie Starkstromfelder oder bewegte Eisenmassen, auftreten, auch die Magnetisierungsintensität $I = \frac{B_f}{4\pi}$ von geraden Eisenproben oder -Stäben aus der Magnetometerablenkung ermittelt werden. Hierbei kommen namentlich zwei Anordnungen in Betracht: einmal bei horizontaler Lage der Magnetisierungsspule des Eisenstabes oder -drahtes, ein zweites Mal bei vertikaler Lage. Abhängig hiervon ergeben sich zunächst die beiden grundlegenden Beziehungen zwischen der Horizontalintensität des Erdfeldes H_h und der Feldintensität bzw. dem Gefälle H_x, welches an dem Ort der Magnetometernadel m von dem zu untersuchenden, elektromagnetisch erregten Eisenstabe mit der Länge L herrührt, in folgender Weise:

α) Horizontale Lage der Magnetisierungsspule.

Ist L die Länge des Prüfdrahtes, dessen Erregerspule zur Erzielung eines hinreichend gleichförmigen magnetischen Gefälles nicht unter $\frac{4}{3} L$ betragen soll (vgl. I, 2 in **181**), so ist der Abstand l der beiden Pole oder Schwerpunkte der Kraftlinienaustrittstellen bei zylindrischen Stäben oder Drähten etwa $\frac{5}{6} L$, hingegen $\frac{3}{4} L$ bei der hinsichtlich der Scherung oder des Entmagnetisierungsfaktors (vgl .I, 2 in **291**) genauer berechenbaren Rotationsellipsoiden. Ist die Mitte des Prüfdrahtes senkrecht zur Richtung des magnetischen Meridians bzw. zu H_h (vgl. Fig. 237), so erzeugt H_x eine Ablenkung α, welche durch die Beziehung

$$H_x = H_h \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

gegeben ist. Da ferner für eine Entfernung $d > \frac{3}{2} l$ mit hinreichender Genauigkeit für zylindrische Stäbe mit dem Querschnitt q

$$H_x = \frac{q \cdot I}{s^2} \cdot \frac{l}{s}$$

ist, so folgt die Magnetisierungsintensität des Prüfdrahtes zu

$$I = \frac{H_h \cdot s^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{q \cdot l} \, .$$

Praktisch kann nun die Bedingung $d > \frac{3}{2} l$ deshalb unbequem werden, weil mit Rücksicht auf genügende Bestimmtheit und Kleinheit des Entmagnetisierungsfaktors $l \geqq 300\,\delta$ sein soll, wenn δ den Durchmesser des Eisenstabes oder -drahtes bezeichnet (vgl. hierzu Bd. I, 2 Fig. 371 in **292**). Um diese Schwierigkeit der Beschaffung eines genügend großen störungsfreien Meßraumes zu verringern, wird man daher vielfach die von Ewing (Magn. Ind. § 40) angegebene Methode vorziehen, die im Gegensatz zur vorstehenden mit gleicher Entfernung beider Pole von m, wohl auch als „unipolare“ bezeichnet wird.

β) Vertikale Lage der Magnetisierungsspule.

Hierbei wird, wie Fig. 238 andeutet, der eine Pol des Prüfstabes bzw. Eisendrahtes in derselben Horizontalebene mit der Magnetometernadel angeordnet. Alsdann wird das in Richtung der Kraft F_x vorhandene Gefälle H_x

stimmung würde eine Eichung der Skala mit 2 Normalblechen von bekannten und die Werte der Prüfbleche einschließenden Magnetisierungswerten voraussetzen mit einem ähnlichen Verfahren der Auswertung, wie bei dem Hysteresepüfer von EWING (vgl. **170**). Häufig handelt es sich aber gar nicht um eine genaue zahlenmäßige Messung, sondern nur um eine Vergleichung unter Einschließen in Grenzen.

Für Fabriklaboratorien kann daher vielfach die Messung ganz schematisch gestaltet und von ungeschultem Personal ausgeführt werden, etwa in der Art, daß von den zu prüfenden Blechen, z. B. für Weicheiseninstrumente bestimmt, alle ausgemerzt werden, bei denen der Ausschlag gegenüber einem dauernd benutzten Normalblech mehr als so und so viel Skalenteile nach einer bestimmten Richtung beträgt. Der zulässige Grenzwert braucht alsdann nur einmal durch einen Ingenieur ermittelt zu werden.

Betrachtet man die beiden magnetisierten Eisenproben als zwei magnetische Kreisläufe, welche am Magnetometer zusammentreffen und bei Gleichheit von d_1 und d_2 wegen der entgegengesetzten Richtung der Antriebe sich in ihrer Wirkung aufheben, so kann man diese Anordnung bereits als magnetische Brücke auffassen. Weit ausgeprägter ist das Brückenprinzip aber bei den folgenden Meßanordnungen zur Vergleichung von magnetischen Feldern bzw. Induktionen.

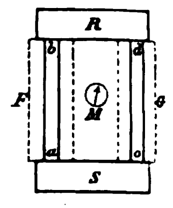


Fig. 240.

184. Grundgedanke der magnetischen Meßbrücke. Die Übertragung der elektrischen Nullmethode, wie sie die WHEATSTONEsche Brücke darstellt, auf die magnetischen Kreislaufverhältnisse würde sich etwa durch folgende Überlegung ergeben. In der Fig. 240 seien *a b* und *c d* zwei magnetisch zu vergleichende Eisenstäbe, welche bei *R* und *S* durch je ein eisernes Joch von verhältnismäßig großem Querschnitt magnetisch verbunden und mit zwei gleichen Magnetisierungswickelungen *F* und *G* versehen sind. Schickt man zunächst nur Strom durch die Wickelung *F*, so daß ein magnetischer Ausgleich mit der Kraftlinienrichtung von *a* nach *b* entsteht, so wird der magnetische Hauptwiderstand des Restkreislaufes durch *d c* gebildet werden, mithin zwischen *R* und *S* in Richtung von *d* nach *c* ein entsprechendes magnetisches Gefälle (H) bestehen müssen, welches bei der magnetischen Leitfähigkeit des Luftweges einen Ausgleich von *R* nach *S* in Form von streuenden Kraftlinien erzeugt; gleichzeitig wird jenes H ein auf diesem Wege aufgestelltes Magnetometer *M* ablenken und sich dadurch wahrnehmbar machen lassen. Schickt man jetzt nach Unterbrechung des Stromes in *F* nur durch die Wickelung *G* einen Strom und zwar in der Richtung, daß der erzielte magnetische Ausgleich durch Kraftlinien in der Richtung von *d* nach *c* gebildet wird, so liegen die Verhältnisse unter Vertauschung von *a b* gegen *d c* ganz entsprechend den vorigen, nur besteht jetzt das magnetische Gefälle (H) von *S* nach *R* und wird *M* um etwa den gleichen Betrag nach der entgegengesetzten Richtung ablenken.

Schickt man jetzt durch *F* und *G* in der vorhin festgestellten Richtung gleichzeitig Strom, so ist leicht einzusehen, daß die von *R* nach *S* verlaufenden Kraftlinien durch die von *S* nach *R* verlaufenden kompensiert werden können, so daß das magnetische Brückeninstrument in Ruhe bleibt. Dies wird offenbar dann eintreten, wenn die magnetischen Gefälle in beiden Richtungen entgegengesetzt gleich groß sind. Nach dem Kreislaufgesetz

ist die erforderliche magnetische Spannung (Fallhöhe) $D_{dc} = N \cdot S_{dc}$ und die zwischen a und b erforderliche magnetische Spannung $D_{ab} = N \cdot S_{ab}$.

Bezeichnet man die für je 2 Übergangsfugen und 1 Joch erforderliche magnetische Spannung mit D_o und setzt dieselbe für gleiches B als konstant und als möglichst klein gegenüber D_{dc} bzw. D_{ab} voraus, so wird für

$$D_F = D_{ab} + D_o \quad \text{und} \quad D_G = D_{dc} + D_o$$

ein Unterschied der magnetischen Spannung zwischen R und S in Wegfall kommen und M keine Ablenkung aus dem magnetischen Meridian zeigen.

Besitzen F und G dieselbe Windungszahl, so ergeben sich aus dem Vorstehenden zwei Möglichkeiten der Abgleichung, welche beide für die Ausführung magnetischer Brücken zu Vergleichsmessungen Anwendung gefunden haben:

α) Bei Erregung von F und G mit derselben Stromstärke, so daß notwendig $D_F = D_G$, muß für beiderseits gleiches D_o auch $D_{ab} = D_{dc}$ sein und für einheitliches N auch $S_{ab} = S_{dc}$. In diesem Fall wird also für $\alpha_M = 0$ eine Abgleichung der magnetischen Widerstände erforderlich, völlig entsprechend den Verhältnissen bei der WHEATSTONE-Brücke.

β) Soll die Verschiedenheit der magnetischen Widerstände S_{ab} und S_{cd} bestehen bleiben, so ist für einheitliches N, das ja in erster Linie durch $\alpha_M = 0$ angezeigt wird, noch die Herstellung der obigen Gleichung dadurch möglich, daß man D_F und D_G durch Benutzung zweier verschiedener Erregerströme ungleich macht und zwar so, daß

$$D_{ab} : D_{cd} = S_{ab} : S_{cd}.$$

Fig. 241.

Die Verschiedenheit der magnetischen Widerstände der beiden Seiten, welche bei Gleichheit der Dimensionen von ab und cd auch mit der Verschiedenheit der Permeabilitäten μ_{ab} und μ_{cd} übereinstimmt, würde also durch die Ermittelung des Verhältnisses

$$D_{ab} : D_{cd} = (D_F - D'_o) : (D_G - D''_o) = \overline{J}_F \left(C_w - \frac{D_o'}{\overline{J}_F}\right) : \overline{J}_G \left(C_w - \frac{D''_o}{\overline{J}_G}\right)$$

bestimmbar sein. Bei Gleichheit der beiden Wickelungskonstanten C_w der Spulen F und G, sowie bei hinreichender Kleinheit von D_o wird also das Verhältnis der gemessenen Stromstärken $\overline{J}_F$ und $\overline{J}_G$ jenes gesuchte Verhältnis $\mu_{ab} : \mu_{cd}$ liefern.

185. Differentialmagnetometer von Eickemeyer.

Die Abgleichung der magnetischen Widerstände bei Benutzung derselben MMK liegt dem Differentialmagnetometer von EICKEMEYER zugrunde (vgl. STEINMETZ ETZ 1891, 581). Seine Meßanordnung zeigt Fig. 241 im Schema. Hierin stellen R und S zwei S-förmige Joche aus gutem norwegischem Eisen vor, welche durch die gemeinsame Magnetisierungsspule FG so magnetisiert werden, daß der Kraftlinienverlauf in Richtung der Pfeile erfolgt. Dieser beiderseits offene magnetische Kreislauf wird einerseits durch die unbekannte Eisenprobe x von gleichförmigem und genau gemessenem Querschnitt geschlossen, während auf der anderen Seite der aus dem Normaleisen N (das nämliche Norweg-Eisen wie die Joche mit genau bekannter B, H-Kurve) bestehende Vergleichsstab sich befindet. Stäbe desselben Eisens mit verschiedenen nach Art eines Gewichtssatzes oder auch Wider-

standskastens abgestuften Querschnittsgrößen sind weiterhin vorhanden, um auf der Seite von x, oder auch von N so lange zugefügt zu werden, bis ein in der Mitte von FG angebrachtes Magnetometer M — hier nur aus einem weichen rautenförmigen Eisenblech mit Aluminiumzeiger bestehend — keinen Ausschlag mehr zeigt.

Hat man z. B. gefunden, daß bei einem zu untersuchenden Gußstahlstab x von $q_x = 4\ \text{cm}^2$ und einem Normalstab N mit gleichfalls $q_n = 4\ \text{cm}^2$ bei $\bar{J} = 1{\cdot}5$ Amp. in der Magnetisierungsspule FG erst dann Gleichgewicht bei M erzielt werden kann, wenn Normaleisenstäbe im Betrage von $q = 1{\cdot}5\ \text{cm}^2$ auf der Seite von x hinzugefügt werden, so folgt hieraus, wenn B_x die spez. Induktion in Gußstahl, B_n diejenige im Normalstab bezeichnet, daß

$$B_x \cdot 4 = B_n (4 - 1{\cdot}5), \qquad \text{also}$$

$$B_x = B_n \cdot \frac{25}{40} = 62{\cdot}5\ \% \text{ von } B_n.$$

Bei jenem Gefälle H beträgt also auch μ_x nur $0{\cdot}625 \cdot \mu_n$. Untersucht man jetzt bei stärkerer Magnetisierung, z. B. $\bar{J} = 4{\cdot}5$ Amp., in FG und findet,

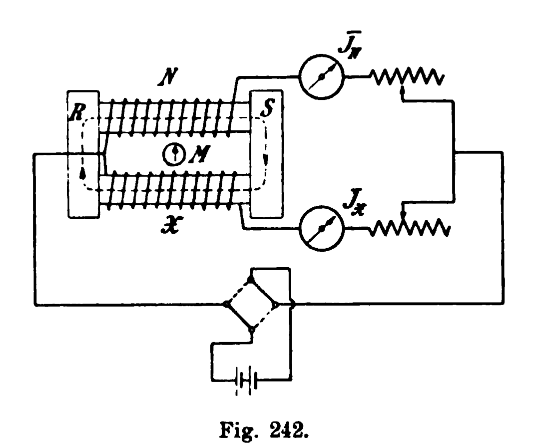


Fig. 242.

daß nur noch $0{\cdot}2\ \text{cm}^2$ Normaleisen auf Seite von x zur Herstellung des Gleichgewichts genügen, so besagt dies, daß nunmehr $B_x = \frac{38}{40} B_n = 0{\cdot}95\, B_n$ und $\mu_x = 0{\cdot}95\, \mu_n$.

Die Hauptfehlerquelle wird auch hier durch etwa vorhandene Verschiedenheiten der Übergangswiderstände zwischen x und RS einerseits, N und RS andererseits gebildet werden, da dieser Fehler nur bei völliger Gleichwertigkeit des magnetischen Widerstandes der Fugen und damit auch von D_0 beseitigt ist, wie die Betrachtungen in **134** erkennen lassen.

186. Permeabilitätsbrücken von Holden und von Ewing.

Die Vergleichung der Eisenprobe x mit einem Normalstabe N, beide von gleichem und unveränderlichem Querschnitt, mit Hilfe der Abgleichung der magnetischen Spannungen bzw. $MMKK$ ist von Holden und von Ewing zu zwei Brückenkonstruktionen verwendet worden.

Die einfachere Ausführung von Holden wird schematisch durch die Fig. 242 dargestellt, die sich durch die Ausführungen in **134** selbst erläutert. Berechnet man für Gleichgewicht bei M hier die magnetischen Widerstände S_N

und S_x, ebenso wie die Permeabilitäten μ_n und μ_x bei **gleicher** Windungszahl der Erregerwickelungen aus der Gleichung

$$S_N : S_x = J_n : J_x \quad \text{oder} \quad \mu_n : \mu_x = \bar{J}_x : \bar{J}_N,$$

so darf nicht übersehen werden, daß nach der letzten Gleichung in **134** der Fehler der Übergangswiderstände nicht wie in **135** bei Gleichheit dieser Widerstände bzw. von D_0 auf beiden Seiten herausfallen würde, sondern nur für

$$D_0' : \bar{J}_F = D_0'' : \bar{J}_G.$$

Diese Fehlerquelle suchte Ewing bei seiner Permeabilitätsbrücke zu beseitigen durch die Möglichkeit, die Stablängen zu variieren, wie Fig. 232 in **127** erkennen läßt, die das Gestell seiner Brücke darstellt. Hierdurch kann man, wie in **127** angegeben, den Scherungsbetrag, den die Übergangsstellen an den Jochen verursachen, ermitteln bzw. eliminieren. Die Variation der magnetischen Spannung D_F und D_G erfolgt hier bei gleicher Stromstärke in beiden Wickelungen durch Zu- oder Abschalten bekannter Windungszahlen. Auch ist die Empfindlichkeit in den Angaben des Brückeninstrumentes M, gleichzeitig auch die sichtbare Annäherung an die Wheatstone-Brücke noch dadurch gesteigert, daß die „Brücke" für die magnetischen Kraftlinien zwischen R und S durch zwei in der Mitte von R und S befestigte Eisenhörner gebildet wird, welche gegeneinander gekehrt für M nur einen Schlitz zwischen sich lassen.

3. Elektromotormethoden.

137. Entwickelung und Geschichte des Meßprinzips.

Ein Dauermagnet, wie er im Magnetometer als beweglicher und konstanter Antriebsfaktor zur Messung eines Feldes im Luftraum Verwendung findet, kann in seiner kontrastierenden Feldwirkung durch einen Leiter ersetzt werden, der von einem elektrischen Strom durchflossen wird. Dieses Elektromotorprinzip ist in seiner Integralfassung durch die Gleichung (siehe II, 1 in **24**) für das Drehmoment

$$D = c_1 \cdot N_I \cdot N_{II} \cdot \sin \delta$$

und in seiner differentiellen Form durch die Gleichung für die Antriebskraft

$$F = B \cdot J \cdot l_w \qquad \text{bezw.} \quad D = B \cdot J \cdot C_w \cdot \sin \delta$$

gegeben.

Aus dem allgemeinen Fall des Elektromotors, bei dem **beide** Felder (N_I und N_{II}), bzw. beide Antriebsfaktoren (B und J) veränderlich sind, ergab sich der für Meßzwecke wichtige Sonderfall, bei welchem der eine Faktor, das Hauptfeld N_I bzw. sein B, konstant gewählt wurde. Durch Verwendung eines Dauermagneten gelangte man so zu den für die heutige Meßtechnik so überaus wertvollen Drehspuleninstrumenten, die in sich magnetisch geschützt sind, d. h. durch Variation des Erdfeldes praktisch in ihren Angaben nicht beeinflußt werden.

Es ist aber noch ein anderer Sonderfall denkbar, der besonders wichtig für die magnetische Meßtechnik ist, namentlich soweit eine rasche Messung mit direkt zeigenden Instrumenten bevorzugt wird. Dieser Sonderfall besteht darin, daß man den zweiten Antriebsfaktor der obigen Gleichung, d. i. das Anker- bzw. Leiterfeld $\bar{N}_{II}$ oder die Spulenstromstärke $\bar{J}_1$ während der Messung konstant hält, diesen Faktor mit in die Instrumentenkonstante

$C = \frac{1}{\bar{J} \cdot C_w}$ hineinnimmt und so eine Messung von B ermöglicht, das nach der Gleichung

$$B = \frac{F}{J \cdot l_w} \text{ bzw. } \frac{D}{\bar{J} \cdot C_w} = C \cdot D$$

bis auf die Konstante C direkt proportional mit dem unschwer meßbaren Drehmoment $D = C_f \cdot \alpha$ wächst. Dieses Elektromotorprinzip mit konstantem Leiter- bzw. Ankerstrom $\bar{J}$ ist in der magnetischen Meßtechnik bisher bei zwei Apparaten benutzt worden:

1. bei dem mehr für Demonstrationszwecke als zur Messung geeigneten Kurvenzeiger für Hystereseschleifen von Ewing;

2. bei dem von der Firma S. & H. (zuerst wohl von Koepsel) ausgeführten direktzeigenden, d. h. hier in Werten von B (Kilolinien) geeichten

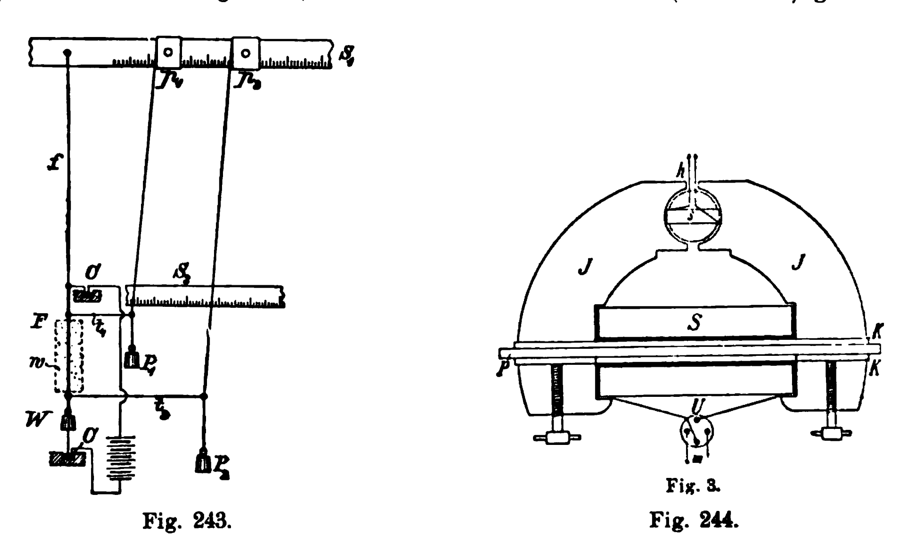


Fig. 243. Fig. 244.

Apparat, der zur Ermittelung der Werte sowohl von aufsteigenden B, H-Kurven, als auch besonders von Hystereseschleifen geeignet ist.

Ewings Apparat, der näher in **168** beschrieben ist, benutzt für die Ordinatenbewegung, welche die Stärke der Induktion B anzeigt, den Antrieb auf einen gerade gespannten Kupferdraht, der von konstantem Gleichstrom $\bar{J}$ durchflossen und deshalb nach der Antriebsgleichung in differentieller Form

$$F = B \cdot (\bar{J} \cdot l_w)$$

einen Antrieb F bzw. eine Ablenkung $c \cdot a$ erfährt, die direkt proportional mit B variiert, sowohl in Größe als Richtung.

Ursprünglich wurde dieses Meßprinzip von W. Thomson (Lord Kelvin) in einer Fadenpendelwage (Fig. 243; vgl. hierzu Du Bois M. Kr. Seite 315) zur a b s o l u t e n Messung von B benutzt nach der Gleichung

$$B = \frac{F}{\bar{J} \cdot l_w}.$$

Bei dieser Meßvorrichtung, die man als eine Art Umkehrung des gleichfalls von Thomson erfundenen Heberschreibers (Syphon-Recorder) ansehen kann.

wird also der mechanische Antrieb F, den der von dem konstanten Gleichstrom $\bar{J}$ durchflossene Draht w mit der wirksamen Länge l_w in dem Magnetfeld mit der zu messenden Induktion B erfährt, durch die Spannung der Fadenpendel $p_1 P_1$ und $p_2 P_2$ unter Verschiebung von p_1 und p_2 kompensiert und mit Hilfe der Größe der Verschiebungen, des Abstandes der Skalen S_1 und S_2, sowie der Gewichte P_1 und P_2 gemessen.

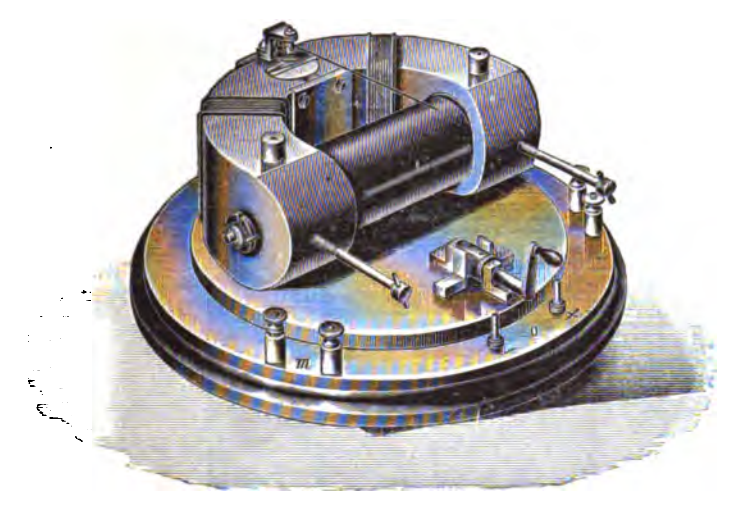


Fig. 245.

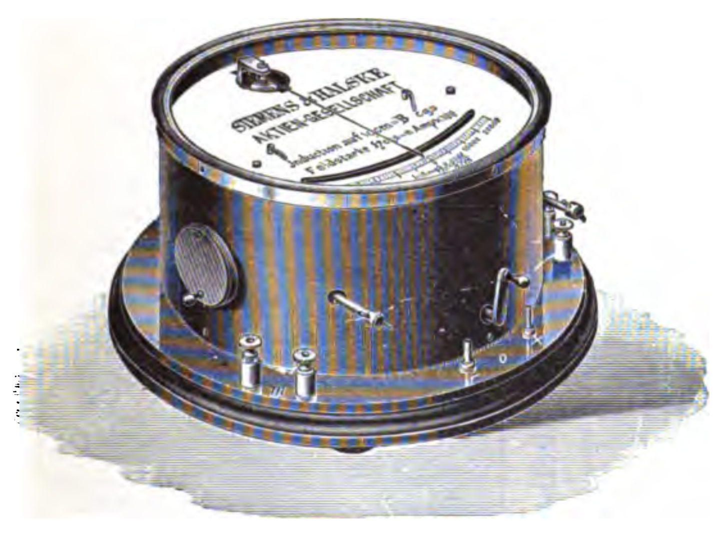


Fig. 246.

138. Drehspuleninstrument von S. & H. nach Köpsel.

Für die Messung von B, namentlich für eine solche mit Zeiger und Skala, eignet sich der Ersatz der Einzelleitung durch eine Spule (Drehspule) unter gleichzeitiger Umgestaltung des wirksamen Feldraumes nach Art der Drehspuleninstrumente besser. Wie diese Ausgestaltung in dem Apparat von S. & H. (Z. f. J., Febr. 1898) erfolgt ist, läßt Fig. 244 erkennen, welche den Hauptapparat schematisch im Querschnitt zeigt, während Fig. 245 seine

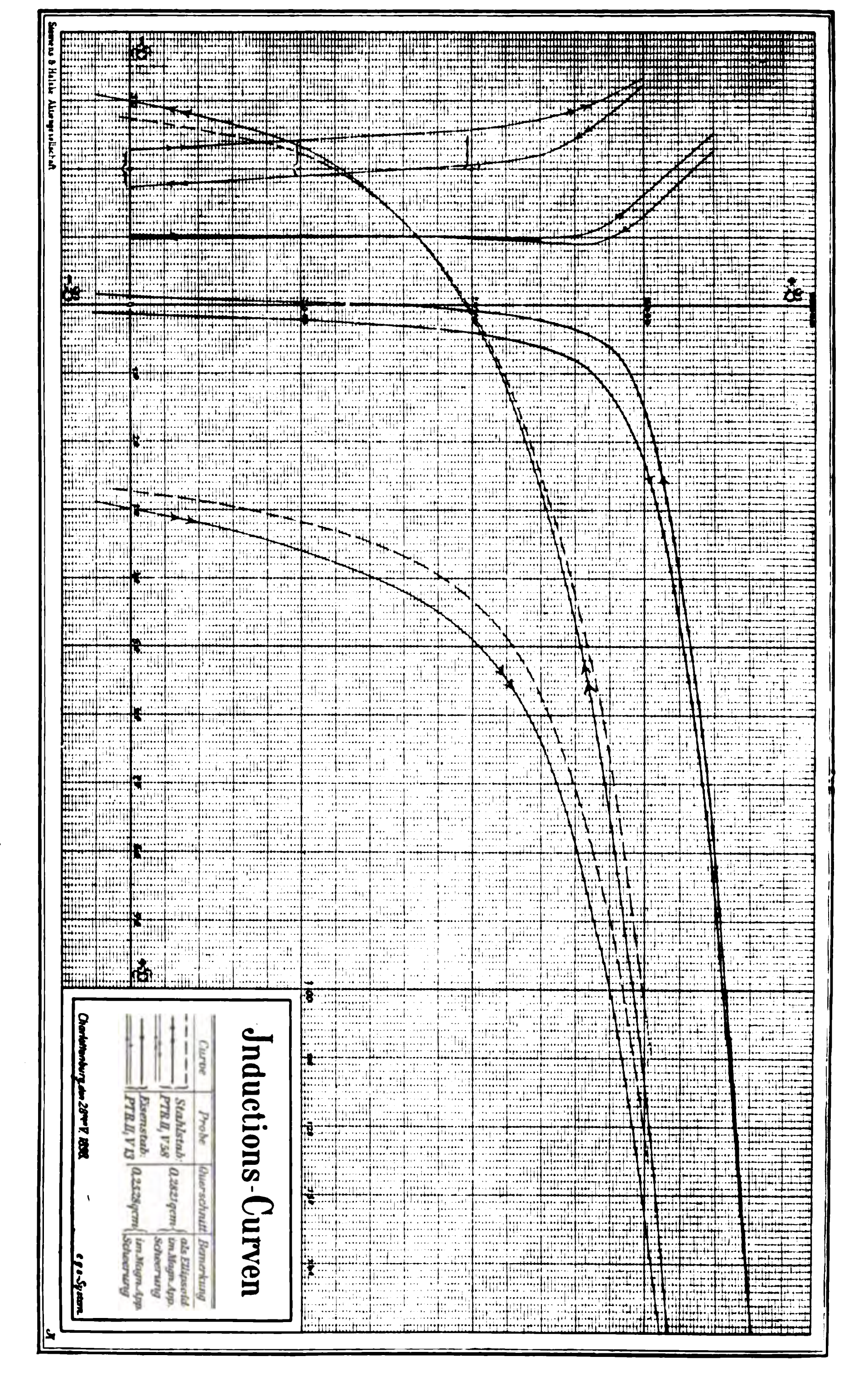

Inductions-Curven
Curve
Probe
Querschnitt
Bemerkung
Stahlstab.
PTR.II, V.58
Eisenstab.
PTR.II, V.13

Fig. 247.

Ansicht bei abgenommener Kappe und Skala gibt, und Fig. 246 seine äußere Ansicht.

Der Prüfstab P (Fig. 244), welcher bei massiven Proben meist kreisförmigen, bei Blechproben meist quadratischen Querschnitt erhält, muß in seinem Querschnitt möglichst genau ausgemessen werden, falls nötig mit Hilfe einer Gewichtsbestimmung und einer Längenbestimmung der Eisenprobe und Einsetzung des spezifischen Gewichtes zu 7·77. Mit Hilfe der Klemmbacken K wird er hierauf in das Eisenjoch J von sehr großem Querschnitt gegenüber P eingespannt, so daß in allen Fällen der Eisenwiderstand praktisch von P zwischen den Klemmbackenenden gebildet wird, oder, was dasselbe sagt, die Rest-*MMK* $D' = D - D''$, welche nach Abzug von D'' (für den Luftweg bei s) für das Eisen verbleibt, praktisch in P aufgebraucht wird. Der Sitz der *MMK* ist die Erregerspule S, welche P umgibt und ihren Strom $\bar{J}$ von einer bei m angeschlossenen Gleichstromquelle über den Umschalter und Ausschalter U erhält.

Die Windungszahl w ist im Verhältnis zur wirksamen Länge l des Prüfstabes so gewählt, daß $D = \frac{4\pi}{10} \cdot \bar{J} \cdot w = H \cdot l$ oder $H = \bar{J} \cdot \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{w}{l}$ für den Zahlenfaktor $\frac{4\pi}{10} \cdot \frac{w}{l}$ den Wert 100 ergibt, so daß $\bar{J} = 1$ Amp. das Bruttogefälle $H = 100$ CGS-Einheiten liefert.

Indem man den Querschnitt des unvermeidlichen Luftraumes für die Drehspule s möglichst groß, seine Dicke zwischen Joch J und innerem Eisenkern möglichst gering wählte, hat man versucht den Scherungsbetrag (H'') gegenüber H möglichst klein zu halten. Immerhin ist seine Größe keineswegs zu vernachlässigen, sowie der Umstand namentlich zu beachten, daß nach den Untersuchungen der Phys. Techn. Reichsanstalt (vgl. Fig. 247) die Streuung mit B veränderlich ist und besonders bei hohen Werten von B eine Korrektur nach den beigegebenen Scherungs**linien** (keine Geraden) zu erfolgen hat, die, wie bei allen Untersuchungen von ferromagnetischem, d. h. mit Hysterese begabtem Material, für auf- und absteigende Magnetisierungskurven verschieden sind (vgl. Fig. 252).

Die Drehspule s erhält ihren Gleichstrom J_h bei den Klemmen h zugeführt (Fig. 248). Damit die Skalenwerte für B zutreffen, ist peinlich darauf zu achten, daß dieser Hilfsstrom genau die vermerkte Größe $\bar{J}_h = \frac{\text{Apparatkonstante}}{\text{Querschnitt der Probe}}$ besitzt, d. h. zu dem untersuchten Eisenquerschnitt im richtigen Verhältnis steht und außerdem während einer Meßreihe konstant bleibt, bzw. oft genug durch Messung und feine Nachregulierung des Widerstandes W_h (vgl. Fig. 248) auf seinen vorgeschriebenen Wert gebracht wird.

Die Kompensationswickelung auf dem Joch J, welche Fig. 245 erkennen läßt, wird vom Erregerstrom J_m durchflossen und dient dazu die von der Spule S allein (ohne P) hervorgerufene Induktion im Kreislauf aufzuheben, d. h. den Ausschlag bei Abwesenheit von P auf Null zu halten. Dazu gehört ferner, daß s bei Nullstellung mit dem Hilfsstrom keine Ablenkung durch das Erdfeld erfahre, d. h. die Achse von s in den magnetischen Meridian falle, was am besten durch Drehen des Apparates vor Beginn der Messung empirisch auszuprobieren ist.

Zur Messung der Stromstärken $\bar{J}_m$ und $\bar{J}_h$ wird gewöhnlich ein Drehspuleninstrument mit Umschaltung auf verschiedene Nebenschlüsse zwischen

3, 3 bzw. 2, 2 verwendet, wie das Schaltungsschema der Fig. 249 andeutet. Hierbei ist darauf zu achten, daß das Streufeld dieses Instrumentes durch zu große Nähe keinen Fehler in den Angaben des Hauptinstrumentes hervorruft. Eine Untersuchung auf merkliche Einwirkung erfolgt am besten durch langsames Drehen des Amperemeters, während alle Größen am Hauptinstrument konstant gehalten werden. Weiteres siehe in der Druckschrift Nr. 52 von S. & H. oder ETZ 1898 Heft 25.

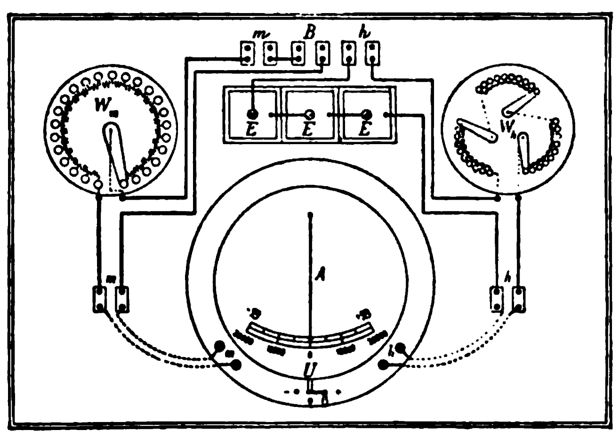
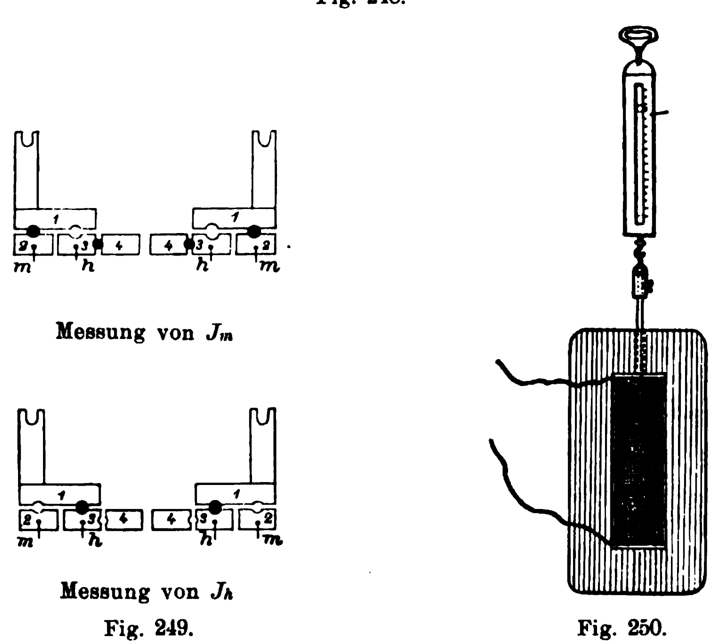


Fig. 248.



Messung von J_m

Messung von J_h

Fig. 249.

Fig. 250.

4. Zugkraftsmethoden.

189. Permeameter.

Die von Maxwell aufgestellte Formel für die Zugkraft

$$Z_1 = c \cdot \frac{B^2}{8\pi},$$

welche nach den Untersuchungen von Bidwell für alle höheren Induktionen ausreichend mit den experimentellen Werten übereinstimmt (siehe I, 2 in 298), bietet scheinbar bei Auflösung nach B zu

$$B = \sqrt{\frac{8\pi}{c} \cdot Z_1} = 10^3 \sqrt{24{\cdot}7\, Z_1} \text{ Kraftlinien auf 1 cm}^2$$

eine sehr einfache und bequeme Methode zur Bestimmung von B, indem man die Abreißkraft Z in kg bestimmt und durch Division von Z mit dem Querschnitt q des zum Abreißen gebrachten Prüfstabes die auf das cm² entfallende Abreißkraft Z_1 in kg ermittelt, und daraus nach der obigen Formel den Wert von B im Prüfstab berechnet. Bei der Ausführung gestaltet sich aber eine genauere Messung aus verschiedenen Gründen schwierig, namentlich wenn es sich um geringere Induktionen und Zugkräfte handelt, bei denen die Einflüsse der mechanischen Reibung und Adhäsion merkliche Fehlerquellen bilden.

Andererseits besitzt sie für höhere Werte von B, wie sie in der Technik in Frage kommen, zur Vergleichung von Eisenstäben (für nicht allzu hohe Ansprüche an prozentuale Zuverlässigkeit) als Werkstattmethode einen gewissen Wert wegen der Einfachheit ihrer Meßanordnung. Eine passende und mit Gewichten nachgeeichte Federwage, ein geeignetes Joch mit Magnetisierungsspule und eine etwas sorgfältige Herrichtung der Probestäbe in Durchmesser und an der Abreißfläche genügen zur Ausführung der Messung. Von den verschiedenen Ausführungen ist das sogenannte Permeameter von S. Thompson, wie es Fig. 250 darstellt, eine der ersten und läßt die Hauptteile deutlich erkennen.

Die Fehlerquelle, welche die Stoßfuge bei nicht tadelloser Ausführung stets bildet, und die hier (Fig. 250) bei ihrer Anordnung am Ende der Magnetisierungsspule wegen der Streuung ziemlich beträchtlich sein kann, haben andere Apparatkonstruktionen zu verbessern versucht, so ein Permeameter nach Kapp (ETZ 1894, 264) und weiterhin eine Konstruktion der Firma Örlikon.

Präzisionsmessungen sind aber mit allen diesen Apparaten, die mehr für die Werstatt als das Laboratorium gedacht sind, wegen der oben angedeuteten Fehlerquellen nicht ausführbar. Die Ausbildung eines Apparates für solche Zwecke unter Benutzung des Zugkraftprinzips hat sich Du Bois durch Ausbildung seiner magnetischen Präzisionswage angelegen sein lassen.

140. Magnetische Wage nach Du Bois.

Die erste Ausführung der magnetischen Wage (siehe Du Bois M. Kr. Seite 367) wies nach den Untersuchungen der Phys. Techn. Reichsanstalt noch einige merkliche Fehlerquellen auf; deshalb wurde sie einer Umkonstruktion unterworfen, in der sie neuerdings von der Firma S. & H. gebaut wird. Diese Ausführung (vgl. Fig. 251, aus Z. f. J. 1900 Heft 4 u. 5) läßt in der Anordnung des magnetischen Kreislaufes eine gewisse Übereinstimmung mit dem in **138** beschriebenen Apparat (Fig. 244) erkennen, weshalb auch die dort angestellten Betrachtungen über Verteilung des magnetischen Antriebes bzw. Scherung hierauf übertragen werden können. Auch hier wird der Prüfstab P von bestimmtem Querschnitt durch ein kräftiges Schmiedeeisenjoch J von einem viel größeren Querschnitt zu einem magnetischen Kreislauf geschlossen, der zwischen Joch J und Sockel S aus Stahlguß zwei kreisförmige Luftspalten von je 18 cm² Fläche und 0·025 cm Dicke enthält. Die Beweglichkeit des Joches und seine Lagerung auf der exzentrisch (zur Apparatmitte) liegenden Schneide Q werden zur Messung der Abreißkraft herangezogen. Die Lagerung (sowohl der Sockel S auf der Rotgußplatte G, als des Joches J auf der Rotgußbrücke) muß natürlich auf unmagnetischem Material erfolgen. Die Einspannung von P erfolgt entweder durch Klemm-

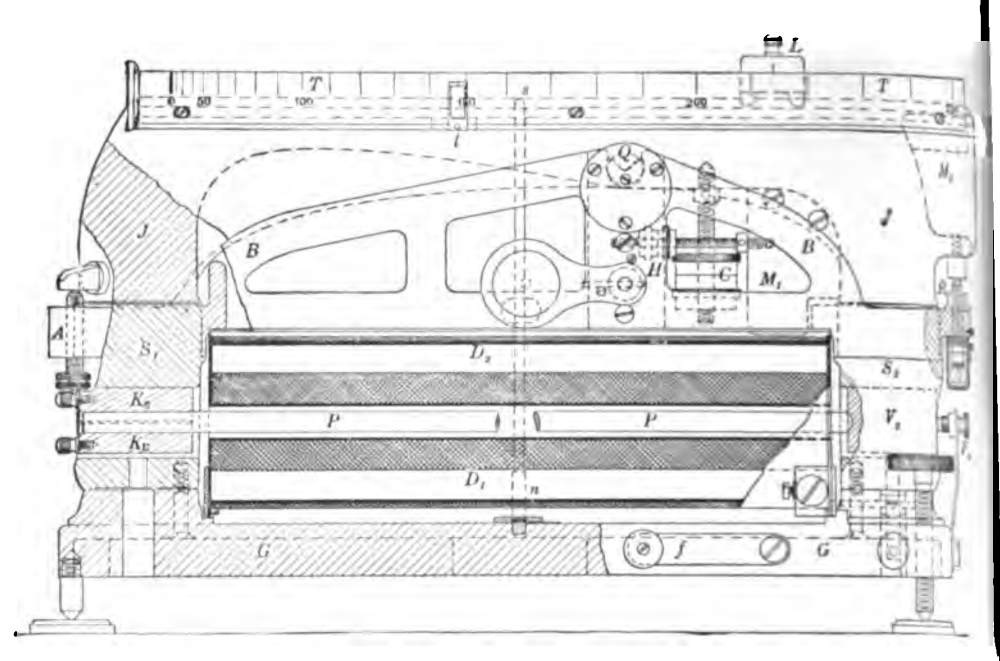


Fig. 251.

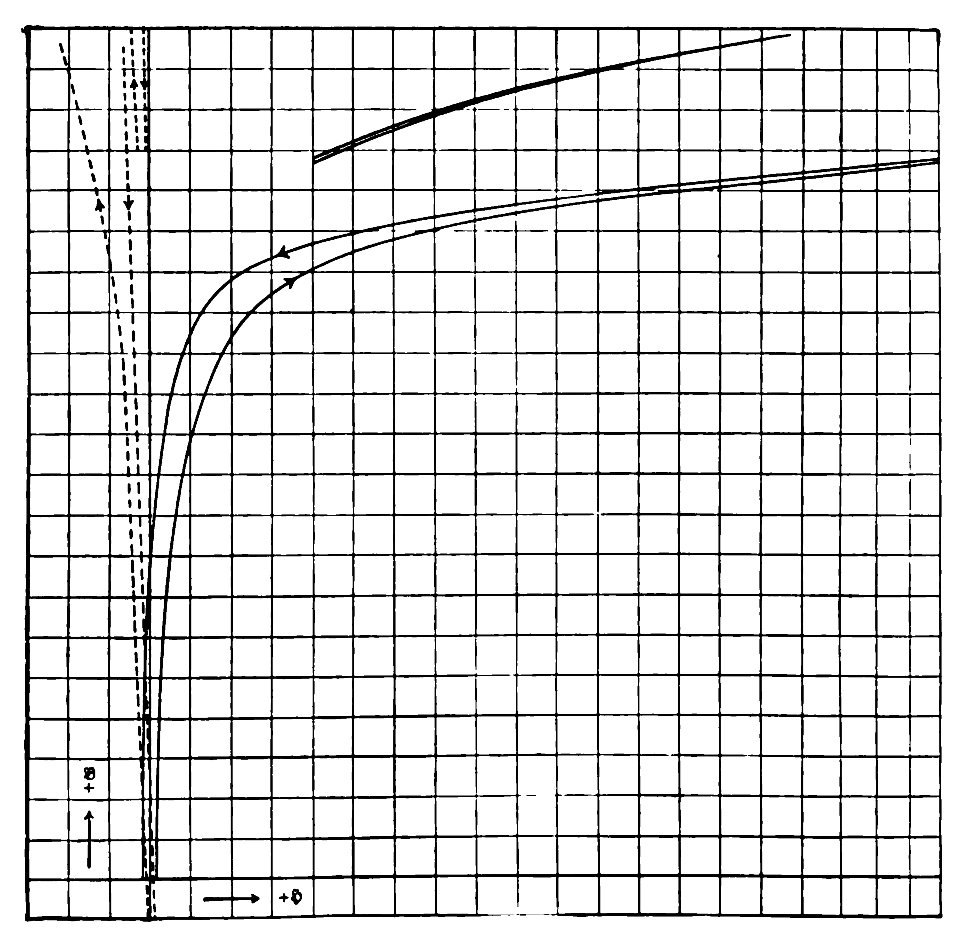


Fig. 252.

backen K (links), oder durch Anpressen an Vollbacken V (rechts) mit Hilfe von Halbkugelkontakten. Die Erregerspule D, in zwei Lagen ausgeführt, ist gleichfalls wie bei Fig. 244 bemessen, so daß $H = 100\,\bar{J}$. Der Scherungsbetrag H'' ist etwa durch die Gleichung bestimmt

$$H'' = 0{\cdot}000\,20\;B \pm 0{\cdot}4,$$

so daß das auf P entfallende Gefälle $H' = H - H''$ betragen würde.

$H' = 100 \cdot \bar{J} - 0{\cdot}000\,20\;B \mp 0{\cdot}4$ ($-$ für auf-, $+$ für absteigenden Ast).

Einfacher und besser ist aber auch hier die Benutzung der Scherungslinien (vgl. Fig. 252) zur Ableitung der Reinkurven aus den Rohkurven für B, H.

Die Abreißkraft wird grob durch ein schwereres Laufgewicht L von 65 g Gewicht und fein durch ein leichteres l von 2·6 g bestimmt, die auf der quadratischen Teilung T verschoben werden. Multiplikation des Einstellwertes von L an der oberen schwarzen Skala und von l an der unteren roten Skala (mit 5 mal kleineren Zahlen) mit 100 liefern für einen Probestabquerschnitt von 1 cm^2 unmittelbar die Werte von B. Das Abgleichen erfordert aber beim Erstreben möglichst großer Zuverlässigkeit (etwa $^1/_2$ $^0/_0$) viel mehr Übung als bei einer Wage mit freischwebendem Balken. Die Hubbewegung läßt sich durch R und den Anschlagstift A justieren.

Weitere Vorsichtsmaßregeln u. dgl. siehe a. a. O.

5. Methoden mit Benutzung der magnetoelektrischen Widerstandsänderung.

141. Messung mit beweglicher Wismutspirale.

Die Erscheinung, daß verschiedene Metalle im magnetischen Feld eine merkliche Änderung ihres Materialkoeffizienten ϱ, des spezifischen elektrischen Widerstandes, erfahren (siehe hierüber Hdb. I, 2 in **217**) zeigt sich in besonders hohem Grade beim Wismut. Diese anscheinend mit dem Hall-Phänomen (siehe Hdb. I, 2 in **273**, sowie in **130** dieses Bandes) zusammenhängende Erfahrungstatsache hat nach mehrfachen Bemühungen, sie zu magnetischen Messungen zu verwerten, endlich in der von Lenard (1890 Wied. Ann. 39, 619) ausgearbeiteten Form zu allgemeiner brauchbaren Meßanordnungen geführt. Nach dem Vorgehen von Lenard und Howard wird chemisch reiner, gepreßter Wismutdraht von weniger als 0·5 mm Dicke zu einer bifilaren Flachspirale aufgewickelt und zwischen zwei Glimmerplättchen verkittet, wie etwa Fig. 253a andeutet. Die Enden des Wismutdrahtes werden mit flachen Kupferdrähten verlötet, jedenfalls der „gefährliche Querschnitt" der Meßanordnung, der sorgfältig vor seitlicher Biegung zu schützen ist, um eine Verletzung der Lötstelle und damit den praktischen Ruin der immerhin ziemlich kostspieligen Meßspirale zu vermeiden.

Um die Messung der Kraftliniendichte B in einem Luftschlitz, z. B. zwischen Polschuh und Anker, auszuführen, wird zunächst der Widerstand der Wismutspirale außerhalb des Feldes, aber bei gleicher Temperatur, also vor allem im gleichen Raume, mit ausreichender Zuverlässigkeit mittels Gleichstrom gemessen. Diese Messung möge $R_0\,\Omega$ ergeben haben; sie erfolgt am besten unter Benutzung einer Wheatstone-Brücke mit Interpolation oder mit kombiniertem Gleitdraht (vgl. **142**) und einem hinreichend empfindlichen Galvanometer, wobei als Anhalt gelten kann, daß eine Änderung des Widerstandswertes um 0·1 $^0/_0$ noch sicher erkennbar sein muß.

Hierauf wird die Spirale vorsichtig an die Meßstelle gebracht, ohne daß

an den Zuleitungen und der ganzen Meßanordnung sonst etwas geändert wird, daselbst mittels Statif festgehalten und wiederum ihr Widerstand bestimmt. Beträgt dieser jetzt $R_B\ \Omega$, so ergibt das Verhältnis $f = R_B : R_0$ den



Fig. 253 a.

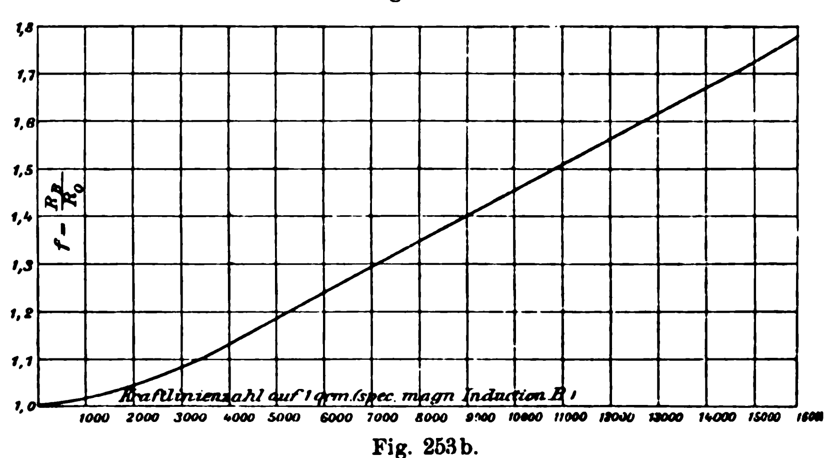


Fig. 253 b.

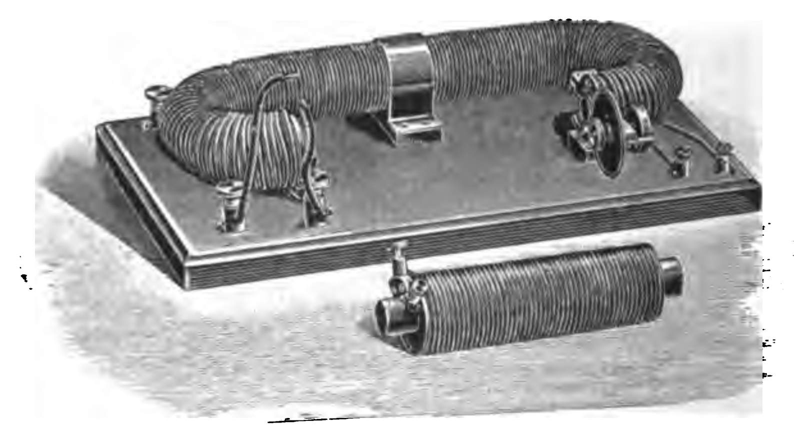


Fig. 254.

gesuchten Wert B bei Benutzung der beigegebenen Eichkurve, deren gewöhnlichen Verlauf Fig. 253 b wiedergibt.

Bei einem Luftschlitz von größerem Querschnitt wiederholt man die Messung an verschiedenen Stellen; noch besser ermittelt man topographisch

die Verteilung von B über jenen Querschnitt, indem man sich die Schlitzfläche in eine genügende Anzahl Unterteile oder Felder geteilt denkt, in deren Mitte je eine Bestimmung von $(B)_m$ ausgeführt wird. Diese Werte werden alsdann in die auf Papier übertragene Flächeneinteilung eingeschrieben.

142. Eisenuntersuchungsapparat nach Bruger.

Neben dieser einfachen Ausführung der Wismutspirale zur Ermittelung höherer Werte von B an beliebigen Stellen des Luftraumes — wie die Kurve in Fig. 253 b erkennen läßt, ist eine höhere prozentuale Zuverlässigkeit meist erst von Werten an zu erwarten, die oberhalb 2 bis 3 Kilolinien liegen — hat die Firma Hartmann und Braun nach dieser Meßmethode noch einen Apparat ausgeführt, der gestatten soll die B, H-Kurven von Eisensorten zu ermitteln. Diese in Fig. 254 abgebildete (anfänglich ausgeführte) Meßvorrichtung besteht aus einem nahezu geschlossenen, elliptisch geformten Eisenkreislauf, der sich aus zwei Teilen zusammensetzt: das auf der Grundplatte befestigte Joch aus schwedischem Eisen und der grade, auswechselbare Prüfstab, von genau gleichem Durchmesser wie das Joch. Beide sind angenähert gleichförmig mit einer magnetisierenden Wickelung von bestimmter, auf der Grundplatte vermerkter Windungszahl umgeben. In dem notwendigerweise auf der einen (rechten) Seite noch verbleibenden Luftschlitz zwischen Prüfstab und Joch ist eine Wismutspirale der obigen Ausführung in einem Messinggehäuse untergebracht und zwar so in Verbindung mit einer Mikrometerschraube, daß mit letzterer der im ganzen Kreislauf nach Einsetzen des Prüfstabes noch verbleibende Luftzwischenraum ausgemessen werden kann; die Mikrometerteilung gibt daher beim völligen Zurückschrauben die äußere Dicke des Messinggehäuses für die Wismutspirale als Minimallänge des Luftschlitzes an, beim möglichst weitgehenden Vorschrauben nach eingesetztem Eisenstab hingegen den wirklich vorhandenen Luftschlitz (meist zwischen 2 und 3 mm). Die Wismutspirale ist in ihrem Durchmesser etwas größer gewählt als der Eisenstabdurchmesser, um so trotz der am Luftschlitz auftretenden Streuung möglichst die ganze aus dem Jochende austretende Kraftlinienzahl die Wismutspirale durchsetzen zu lassen. Die Messung von R_0 erfolgt bei herausgenommenem Prüfstab zur Beseitigung von Remanenzfeldern, außerdem bei möglichst vorgeschraubter Wismutspirale. Die Bestimmung der vorhandenen B-Werte erfolgt wie oben. Über das Verfahren zur Aufstellung von B, H-Kurven siehe in **159**.

Die Nachteile der ursprünglichen Ausführung (Fig. 254), wie sie näher in **159** behandelt werden, sucht eine neuere Ausführung dieses Eisenprüfers, welche Fig. 255 darstellt, möglichst zu vermeiden. Hier wird der zweiteilige Eisenstab F (vgl. Fig. 255 a) durch die federnden Vorreiber H gegen das Schutzgehäuse der Wismutspirale gepreßt, wodurch die Länge des Luftraumes L stets gleich groß bleibt, seine jedesmalige Ausmessung mittels Mikrometerschraube also in Fortfall kommt. Außerdem ist das Schlußjoch J nicht mehr mit demselben Querschnitt wie F, sondern mit einem wenigstens 100 fachen von F ausgeführt, wodurch die Korrektion für J praktisch fortfällt.

Den vollständigen Apparat einschließlich Amperemeter für den Erregerstrom in R, Brückengalvanometer und Brückenwiderständen bzw. Gleitdrähten zeigt Fig. 255 b, während 255 c das Schema der hier benutzten Brückenanordnung wiedergibt, welche bezweckt, die Messung der magnetischen Beanspruchung B in F so bequem als möglich zu gestalten. Dies wird auf folgende Weise ermöglicht: An einen ausgespannten Meßdraht mit den

Schleifkontakten S_1 und S_2 schließen sich zwei Widerstände, $BA = 1\,\Omega$ und $E = R_0$, d. h. gleich dem Widerstande der Wismutspirale bei niedrigster Meßraumtemperatur (etwa 10° C), dann ein zweiter Meßdraht mit dem Schleifkontakt S_3. An S_1 und S_3 wird die Wismutspirale angeschlossen, Galvano-

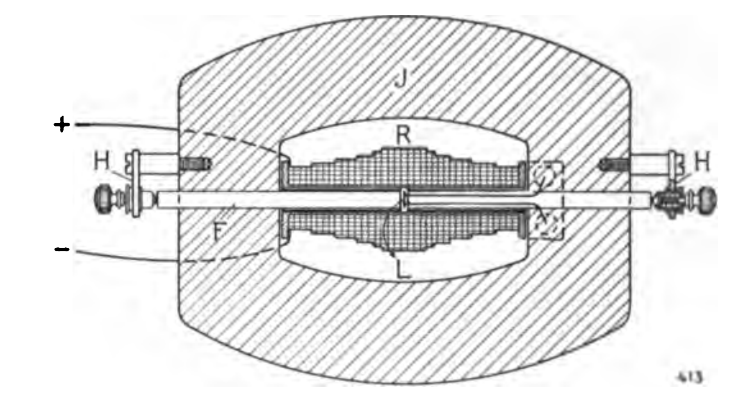


Fig. 255 a.

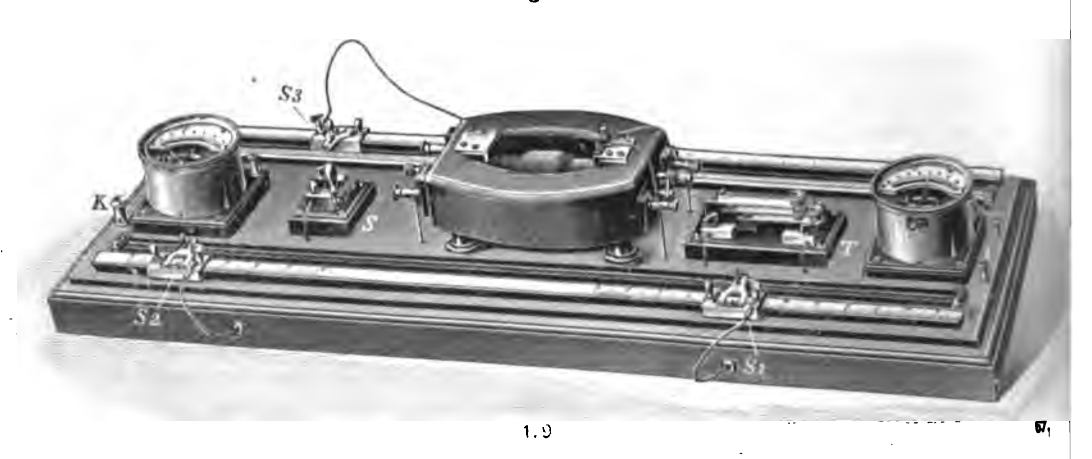


Fig. 255 b.

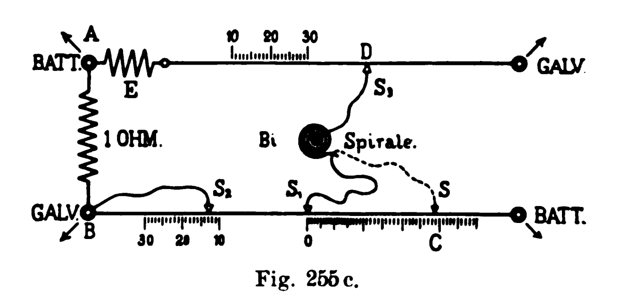


Fig. 255 c.

meter und Batterie an die im Schema von Fig. 255 c entsprechend bezeichneten Klemmen.

Zunächst wird bei der Spirale im Felde Null der Schleifkontakt S_1 auf Null gestellt und S_2 auf die Zahl, welche der Temperatur des Meßraumes entspricht. Hierauf wird Brückengleichgewicht mit Hilfe von S_3 hergestellt. Bringt man nun die Spirale in das zu bestimmende Feld, oder wird F ein-

gesetzt und R erregt, so wird das hierdurch gestörte Brückengleichgewicht jetzt nur durch Verschieben von S_1 wieder hergestellt und die hierzu erforderliche Verschiebung, etwa die Strecke OC, liefert sofort den Wert $f-1=\frac{R_B-R_0}{R_0}$, d. h. die prozentuale Widerstandszunahme der Wismutspirale, was gestattet, den Wert von B aus der Eichkurve (Fig. 253b) unmittelbar abzulesen, ja für dieselbe Spirale sogar eine Eichung der Skala für S_1 unmittelbar in Einheiten von B ermöglicht.

Auch hier wird also unmittelbar eine Luftinduktion B zur Messung gebracht, wie dies die Anwendung der Wismutspirale notwendig voraussetzt, und auf die gesuchte Eiseninduktion B_f aus jenem B geschlossen, ein Verfahren, das zwar für Vergleichsmessungen eine genügende Berücksichtigung der Streuungsfehler gestattet, aber bei absoluten Messungen merkliche Fehler gegenüber dem wirklichen Wert zur Folge haben kann. Dies Verfahren des rechnerischen Schlusses haftet übrigens bei der Bestimmung von Eiseninduktionen auch allen bisher erwähnten Methoden mehr oder weniger an, da sie gleichfalls Luftinduktionen zur unmittelbaren Messung bringen, wenn auch die Luftfuge in einzelnen Fällen, wie bei einigen Permeameteranordnungen, auf sehr geringe Werte gebracht werden kann. Die unmittelbare Messung von Eiseninduktionen unter Vermeidung der Streuungsfehler, oder auf der anderen Seite die Messung der gesamten Streulinien gestatten erst die folgenden Methoden, welche als Induktionsmethoden zusammengefaßt wohl aus diesem Grunde mit die praktisch wichtigsten Meßmethoden darstellen. Allerdings darf als wesentlicher Grund für diese Tatsache auch der Umstand nicht übersehen werden, daß sie den übrigen Methoden gegenüber, welche eine mehr oder weniger große Beschränkung im Anwendungs- und Meßbereich aufweisen, sich verhältnismäßig leicht an die verschiedensten Meßverhältnisse anpassen lassen, sowohl was die Form der verfügbaren Eisenproben, als auch was den Bereich der zu messenden Induktionswerte (B) bzw. Felder (N) anlangt.

6. Induktionsmethoden.

148. Hauptarten der Induktionsmethoden.

Die magnetelektrische Induktion, d. i. die Erzeugung einer elektrischen Spannung bzw. EMK beim Schneiden von magnetischen Kraftlinien (I, 1 in 97 ff.), welche unter den Methoden der elektrischen Spannungserzeugung technisch weitaus an erster Stelle steht, liefert auch für die magnetische Meßtechnik die praktisch wichtigsten Meßmethoden zur Messung von Feldern (N) oder magnetischen Beanspruchungen (B). Als Grund hierfür sind neben den bereits am Schluß des letzten Artikels (142) angegebenen theoretischen Vorzügen noch der für die praktische Durchführung bedeutungsvolle zu erwähnen, daß die elektrische Spannung, als die hier unmittelbar zur Messung gelangende Feldwirkung, eine genauere und vielfach auch einfachere Ermittelung zuläßt, als die mechanischen oder sonstigen Feldwirkungen, ganz abgesehen davon, daß diese Meßgröße dem Elektrotechniker im Besonderen viel vertrauter ist als andere.

Für die Messung der Kraftlinienzahlen N dienen beide Formen der Spannungserregung:

1. Der Spannungsstoß oder die Integralspannung

$$N = \frac{1}{w_{II}} \int e\,dt = \frac{R}{w_{II}} \int i \cdot dt = \frac{R}{w_{II}} \cdot C_b \cdot \alpha,$$

wie sie beim einmaligen Schneiden der N Kraftlinien in der Prüfspule mit w_{II} Windungen auftritt uud durch das Schwingungsgalvanometer mit der ballistischen Konstanten C_b und dem Stromkreiswiderstand $R\,\Omega$ durch den Ausschlag α gemessen wird.

Nicht unerwähnt möge bleiben, daß auch die Möglichkeit besteht die Integralspannung $\int e\,dt$ und damit auch die sekundären Kraftlinienwindungen $N \cdot w_{II}$ direkt (ohne Überführung in den Strömungsstoß $\int i\,dt$ mit Hilfe des Ausgleichs durch den OHMschen Widerstand R) durch ein Schwingungs e l e k t r o m e t e r zu messen. Die Summierung der Spannungsantriebe $\int e\,dt$ und ihre Messung durch den Ausschlag eines eigens hierfür hergerichteten und mit Hilfe einer Induktionsnormale (II, 1 in 17) geeichten Elektrometers sind in ganz ähnlicher Weise denkbar, wie die Messung von $\int i\,dt$ durch ein Schwingungsgalvanometer. Praktisch dürfte aber diese Methode keine nennenswerte Bedeutung haben, da die für alle anderen Messungen brauchbar gemachten elektrostatischen Spannungszeiger viel zu starke Dämpfungen besitzen, um sie für die Messung von Spannungsstößen mit Hilfe eines Schwingungsausschlages gebrauchen zu können. Mir ist es wenigstens nicht gelungen hiermit brauchbare Messungen auszuführen.

2. Die Dauerspannung $\tilde{E}$ bei Wechselfeldern $\tilde{N}$, welche durch die Kraftliniengleichung

$$\tilde{E} \cdot 10^8 \cdot \text{Volt} = \tilde{N} \cdot \omega_e \cdot w = (B')_m \cdot q \cdot f_e \cdot 2 \cdot z \cdot w$$

mit dem effektiven Mittelwert des Feldes $\tilde{N}$, der Polargeschwindigkeit ω_e und der Windungszahl w bzw. mit dem Maximalwert $(B')_m$ der mittleren magnetischen Induktion im Querschnitt q und dem Formfaktor f_e der Spannungswelle (für Sinuswelle $f_e = 1 \cdot 11$) neben der sekundlichen Wechselzahl z verbunden ist.

Ist hierdurch bereits eine natürliche Trennung gegeben in Meßanordnungen zur Bestimmung von Gleichfeldern $\bar{N}$, welche als Hauptinstrument für die Messung des Spannungs s t o ß e s ein Schwingungs g a l v a n o m e t e r benötigen, und in Meßanordnungen zur Ermittelung von Wechselfeldern $\tilde{N}$. welche als Hauptinstrument für die Messung der Dauerspannung $\tilde{E}$ ein geeignetes Wechselstrom v o l t m e t e r erfordern, so lassen sich hieraus für die notwendige e l e k t r i s c h e Meßanordnung auch noch weitere Unterscheidungen ableiten, welche unabhängig von den verschiedenen Möglichkeiten der Anordnung des magnetischen Kreislaufes und den daraus sich ergebenden Rücksichten bestehen. Alle Induktionsmethoden nämlich, welche die Messung eines Gleichfeldes durch einmaliges Schneiden von g l e i c h s i n n i g bewegten Kraftlinien durchführen, benötigen für den Meßstromkreis einer eigenen Prüfwickelung II, die von der Erregerwickelung I elektrisch getrennt und mit ihr nur durch W e c h s e l induktion verbunden ist, weshalb in diesen Fällen besondere Sorgfalt auf Erreichung einer ausreichenden elektromagnetischen Zwangläufigkeit, d. h. einer vernachlässigbar kleinen Streuung zwischen I und II zu verwenden ist. Bei der Messung von pulsierenden oder Wechselfeldern. welche also j e d e den Prüfquerschnitt umgebende Wickelung von wechselsinnig bewegten Kraftlinien schneiden lassen und in ihr nach der letzten Gleichung eine stationäre Wechselspannung $\tilde{E}$ erzeugen, kann man zwar auch, wie bei Gleichfeldern, die W e c h s e l induktion zur Messung benutzen.

indem man eine von I getrennte Sekundärwickelung II für Meßzwecke anordnet. Handelt es sich aber nicht um Streuungsmessungen, also um die Bestimmungen von Felddifferenzen, welche diese Anordnung notwendig machen, sondern um die Ermittelung einer magnetischen Induktion $(B)_m$, so läßt sich die Anordnung einer Sekundärwickelung vermeiden, da jene stationäre Wechselspannung $\tilde{E}$ nach der Kraftliniengleichung auch in I induziert werden muß. Hier tritt sie als Gegen-*EMK* der Selbstinduktion auf und bildet bei geeigneter Ausführung der Erregerspule eine so überwiegende Komponente $\tilde{E}_l$ der von außen zugeführten und an den Enden der Erregerspule meßbaren Spannung $\tilde{E}_g$, daß die Differenz entweder ganz zu vernachlässigen, oder doch mit Hilfe einer verhältnismäßig kleinen Korrektion zu berücksichtigen ist.

Weiterhin kann man sowohl bei gleichsinniger Induktion in der Prüfspule, als auch bei wechselnder Induktion, noch die für die praktische Ausführung der Messung wichtige Unterscheidung treffen in Anordnungen, bei denen während der Messung die Prüfspule bewegt wird (gegenüber dem zu messenden Felde) und in Anordnungen, bei denen sie ruht. Diese 4 Verfahren sollen jetzt kurz der Reihe nach besprochen werden.

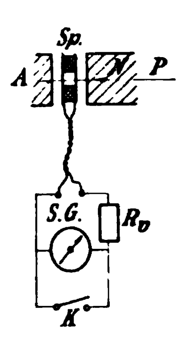


Fig. 256.

a) Gleichsinnige Induktion mit Schwingungsgalvanometer.

144. Bewegliche Prüfspule. Enge Luftzwischenräume.

Zur Messung stationärer Gleichfelder in Luftzwischenräumen, z. B. der Induktion B zwischen Polschuh P und Anker A (Fig. 256), kann man sich einer möglichst flachen (etwa 2 bis 3 mm dicken) Prüfspule Sp bedienen, die man durch sorgfältige Bewickelung eines entsprechenden Spulengehäuses, etwa aus Hartgummi, mit seidenumsponnenen Kupferdraht erhält. Ist die Windungszahl w, z. B. 50, und der mittlere Windungsquerschnitt, z. B. $(q)_m = 7{\cdot}793\ \text{cm}^2$ bei einem Spulenwiderstand von $3{\cdot}11\ \Omega$, genau bestimmt, so wird man die Kraftlinienzahl N bzw. die mittlere Induktion innerhalb $(q)_m$ zu $(B)_m = N : (q)_m$ mit Hilfe des Schwingungsgalvanometers S.G. bestimmen können, wenn man die Enden der Prüfspule mit dem Schwingungsgalvanometerkreis verbindet und nach Wahl eines passenden Vorschaltwiderstandes R_v die Prüfspule Sp rasch (aus ihrer Stellung in dem zu messenden Felde N) herauszieht und in eine Stellung verbringt, in der die von ihr umfaßte Kraftlinienzahl vernachlässigbar klein ist gegenüber der Meßgröße. Nach der bereits oben angegebenen Gleichung erhält man alsdann

$$N = (B)_m \cdot (q)_m = \frac{1}{w}\int e\,dt = \frac{R}{w}\int_0^\tau i\,dt = \frac{R}{w} \cdot C_b \cdot \alpha \cdot 10^8 \text{ Kraftlinien.}$$

Hierin soll R neben den schon oben erläuterten Symbolen den elektrischen Widerstand in Ω des ganzen Schwingungsgalvanometerkreises einschließlich Prüfspule Sp bedeuten.

Benutzt man, wie heut wohl in der Regel, als Schwingungsgalvanometer, dessen Verhalten und Theorie schon früher (Hdb. II, 1 in **23**, **24** bzw. Hdb. I, 2 in **193** ff.) eingehender behandelt wurde, ein Drehspulen-Spiegelinstrument, so ist darauf zu achten, daß die ballistische Konstante $C_b = C \cdot \frac{\tau}{\pi} \cdot k^{\frac{1}{\pi}\operatorname{arctg}\frac{\pi}{\lambda}}$ in der obigen Formulierung insofern

$$N = \frac{1}{w_{II}} \int e\,dt = \frac{R}{w_{II}} \int i \cdot dt = \frac{R}{w_{II}} \cdot C_b \cdot \alpha,$$

wie sie beim einmaligen Schneiden der N Kraftlinien in der Prüfspule mit w_{II} Windungen auftritt uud durch das Schwingungsgalvanometer mit der ballistischen Konstanten C_b und dem Stromkreiswiderstand $R\,\Omega$ durch den Ausschlag α gemessen wird.

Nicht unerwähnt möge bleiben, daß auch die Möglichkeit besteht die Integralspannung $\int e\,dt$ und damit auch die sekundären Kraftlinienwindungen $N \cdot w_{II}$ direkt (ohne Überführung in den Strömungsstoß $\int i\,dt$ mit Hilfe des Ausgleichs durch den Ohmschen Widerstand R) durch ein Schwingungselektrometer zu messen. Die Summierung der Spannungsantriebe $\int e\,dt$ und ihre Messung durch den Ausschlag eines eigens hierfür hergerichteten und mit Hilfe einer Induktionsnoimale (II, 1 in **17**) geeichten Elektrometers sind in ganz ähnlicher Weise denkbar, wie die Messung von $\int i\,dt$ durch ein Schwingungsgalvanometer. Praktisch dürfte aber diese Methode keine nennenswerte Bedeutung haben, da die für alle anderen Messungen brauchbar gemachten elektrostatischen Spannungszeiger viel zu starke Dämpfungen besitzen, um sie für die Messung von Spannungsstößen mit Hilfe eines Schwingungsausschlages gebrauchen zu können. Mir ist es wenigstens nicht gelungen hiermit brauchbare Messungen auszuführen.

2. Die Dauerspannung $\tilde{E}$ bei Wechselfeldern $\tilde{N}$, welche durch die Kraftliniengleichung

$$\tilde{E} \cdot 10^8 \cdot \text{Volt} = \tilde{N} \cdot \omega_e \cdot w = (B')_m \cdot q \cdot f_e \cdot 2 \cdot z \cdot w$$

mit dem effektiven Mittelwert des Feldes $\tilde{N}$, der Polargeschwindigkeit ω_e und der Windungszahl w bzw. mit dem Maximalwert $(B')_m$ der mittleren magnetischen Induktion im Querschnitt q und dem Formfaktor f_e der Spannungswelle (für Sinuswelle $f_e = 1 \cdot 11$) neben der sekundlichen Wechselzahl z verbunden ist.

Ist hierdurch bereits eine natürliche Trennung gegeben in Meßanordnungen zur Bestimmung von Gleichfeldern N, welche als Hauptinstrument für die Messung des Spannungsstoßes ein Schwingungsgalvanometer benötigen, und in Meßanordnungen zur Ermittelung von Wechselfeldern $\tilde{N}$, welche als Hauptinstrument für die Messung der Dauerspannung $\tilde{E}$ ein geeignetes Wechselstromvoltmeter erfordern, so lassen sich hieraus für die notwendige elektrische Meßanordnung auch noch weitere Unterscheidungen ableiten, welche unabhängig von den verschiedenen Möglichkeiten der Anordnung des magnetischen Kreislaufes und den daraus sich ergebenden Rücksichten bestehen. Alle Induktionsmethoden nämlich, welche die Messung eines Gleichfeldes durch einmaliges Schneiden von gleichsinnig bewegten Kraftlinien durchführen, benötigen für den Meßstromkreis einer eigenen Prüfwickelung II, die von der Erregerwickelung I elektrisch getrennt und mit ihr nur durch Wechselinduktion verbunden ist, weshalb in diesen Fällen besondere Sorgfalt auf Erreichung einer ausreichenden elektromagnetischen Zwangläufigkeit, d. h. einer vernachlässigbar kleinen Streuung zwischen I und II zu verwenden ist. Bei der Messung von pulsierenden oder We[illegible] welche also jede den Prüfquerschnitt umgebende Wickelun[illegible] sinnig bewegten Kraftlinien schneiden lassen und in ihr [illegible] Gleichung eine stationäre Wechselspannung $\tilde{E}$ erzeugen [illegible] auch, wie bei Gleichfeldern, die W[illegible]

indem man eine von ...
ordnet. Handelt es sich ...
Bestimmungen von Feld...
sondern um die Ein...
die Anordnung einer ...
Wechselspannung $\tilde{E}$ ...
muß. Hier tritt ...
geeigneter Ausführung ...
$\tilde{E}_I$ der von außen ...
Spannung $\tilde{E}_g$, ...
mit Hilfe einer ...

Weiterhin kann man ...
spule, als auch ...

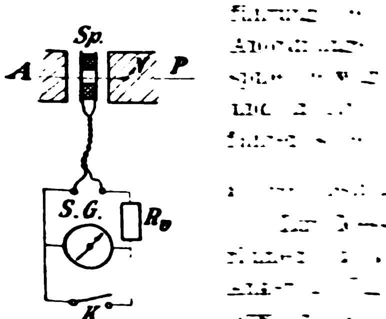


Fig. 256.

Kupferdraht ...
Windungsquer...
von 3·11 Ω, ...
mittlere Induk...
galvanometers ...
mit dem Schw...
passenden Vor...
in dem zu messenden ...
in der die von ...
über der Meig...
man alsdann

$$N = [illegible]$$

Hierin soll R ...
Widerstand ...
Prüfspule Sp ...

Benutzt ...
galvanometer, ...
in 23, 24 bzw. ...
spulen-Spiegel...

Konstante $C_1 =$ ...

keine Konstante ist, als sie meist in hohem Grade von den Widerstandsverhältnissen im Galvanometerstromkreis abhängig ist, da der in ihr enthaltene Dämpfungsfaktor $k^{\frac{1}{\pi}\operatorname{arctg}\frac{\pi}{\lambda}}$ abhängig von dem äußeren Widerstand $r = R_v + R_{Sp}$ mehr oder weniger stark variiert. Um ein rascheres Arbeiten zu ermöglichen, wird man daher gut tun, sich **vor** Beginn der Messungen für das zu benutzende Schwingungsgalvanometer die Dämpfungskurven abhängig vom äußeren Widerstand r in Ω empirisch zu ermitteln, indem man das Dämpfungs**verhältnis** k aus einer größeren oder kleineren Zahl n von Schwingungen zu $k = \sqrt[n]{\frac{\alpha_0}{\alpha_n}}$ bestimmt, den obigen Dämpfungs**faktor** dazu berechnet und den letzteren, oder auch beide Werte abhängig von r als Abszisse graphisch aufträgt, etwa wie dies Fig. 257 für ein stark

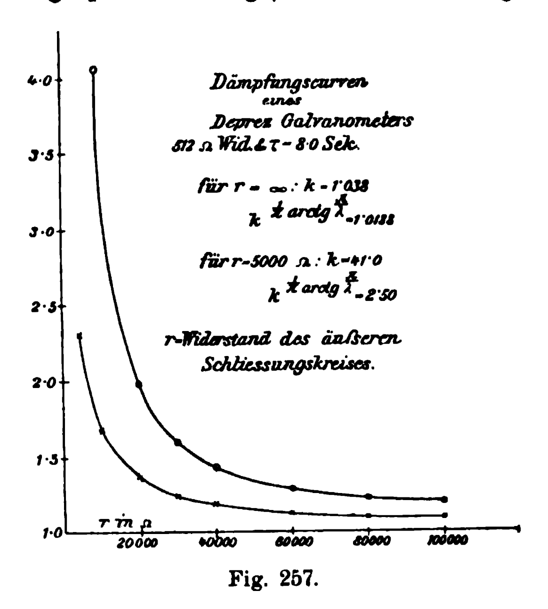


Fig. 257.

gedämpftes CARPENTIER-Instrument angibt. Diese Berücksichtigung der Dämpfung hat auch bei allen folgenden Schwingungsgalvanometermethoden zu geschehen.

Desgleichen empfiehlt sich ein vorausgehender ungefährer Überschlag für den zu erwartenden Ausschlag α und die etwa nötigen Vorschaltwiderstände R_v nach der Gleichung

$$\alpha = \frac{(B)_m \cdot (q)_m \cdot w \cdot \pi}{R \cdot C \cdot \tau \cdot k^n \cdot 10^8},$$

um für die durch die Verhältnisse meist gegebenen Zählerwerte keine unpassenden Nennerwerte, namentlich in Gestalt eines Schwingungsgalvanometers mit einer ungeeigneten Stromkonstanten C, oder eines zu großen Dämpfungsfaktors k^n zu wählen. Letzteres wäre namentlich für den vorliegenden Fall einer Prüfspule mit verhältnismäßig kleinen Werten von $(q)_m$ und w zu beachten, da infolgedessen das R für nicht sehr hohe Werte von $(B)_m$ voraussichtlich klein gewählt werden muß und die einfache Schwingungsdauer τ keine nennenswerte Abweichung von dem praktisch bequemsten

Wert von etwa 10 Sekunden zuläßt. Ein hinreichend großes α wird in solchen Fällen daher nur durch Wahl eines Schwingungsgalvanometers von genügender Stromempfindlichkeit (C etwa 10^{-8} bis 10^{-10} Amp.) und nicht zu großer Dämpfung für kleine Vorschaltwiderstände bzw. Gesamtwiderstände R erreichbar sein. Das in Fig. 257 charakterisierte Drehspuleninstrument wäre also trotz genügender Stromempfindlichkeit (Größenordnung von C ist 10^{-8} Amp.) wegen seiner hohen Dämpfung für die vorliegende Meßmethode wenig oder auch gar nicht geeignet, während es für andere Meßanordnungen mit weit höheren Zählerwerten in der Gleichung für α recht gut verwendbar ist.

Die Umformung der Induktions-Gleichung in

$$N = \left(\frac{R \cdot C_b \cdot 10^8}{w}\right) \cdot \alpha \qquad \text{oder in}$$

$$B = \left(\frac{R \cdot C_b \cdot 10^8}{q \cdot w}\right) \cdot \alpha$$

läßt erkennen, daß für feststehende (konstante) Faktoren des Klammerausdruckes die Skala direkt in Kraftlinien (N) oder in magnetischen Beanspruchungen (B) geeicht werden kann.

145. Weite Luftzwischenräume und Erdfelder.

Handelt es sich um die Messung der magnetischen Induktion in Lufträumen von größeren Dimensionen, so kann man eine Verdoppelung der geschnittenen Kraftlinienzahl N herbeiführen, indem man die Prüfspule nicht herauszieht, sondern sie um 180° dreht, da eine Drehung um 90° die Abnahme der von der Prüfspule umfaßten Kraftlinienzahl N auf Null bewirkt (Fig. 258) und die Drehung um weitere 90° wiederum ihr Anwachsen auf N, und zwar bei gleichsinniger Induktionswirkung im Draht der Prüfspule.

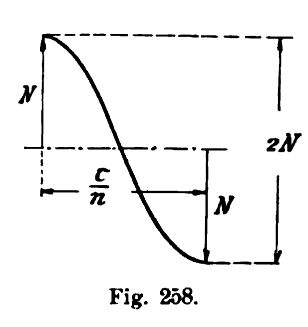


Fig. 258.

Diese für die Größe von α maßgebende Änderung um $2\,N$ muß aber in einer Zeit $\frac{\tau}{n}$ erfolgen, wenn τ die einfache Schwingungsdauer des Galvanometers und n das Mehrfache von 1 beträgt. Außerdem muß dafür gesorgt sein, daß die Spule mit ihrer Achse vor Beginn und nach Schluß der Drehung genau in die Richtung der Kraftlinien fällt, was einerseits ein hinreichend homogenes Feld, andererseits richtig angeordnete Anschläge für die drehbar eingerichtete Spule bedingt. Beides wird praktisch nur in seltenen Fällen zutreffen, doch wird diese Methode dann bedeutungsvoll werden, wenn es aus irgend einem Grunde nicht angängig ist, die Prüfspule durch translatorische Bewegung in eine Lage überzuführen, in der sie eine gegenüber dem Meßfeld verschwindende Kraftlinienzahl umfaßt, und wenn außerdem eine Kommutierung des Meßfeldes nach einer der folgenden Methoden nicht zulässig ist.

Dieser Fall liegt namentlich vor, wenn das Erdfeld selbst in seiner Intensität gemessen werden soll. Die um 180° drehbare Prüfspule mit größerem Durchmesser (meist 30 cm und darüber) bezeichnet man in diesem Fall als Erdinduktor, dessen Drahtenden bzw. Klemmen an das Schwingungsgalvanometer, wie in Fig. 256 angegeben, angeschlossen werden. Da aber die aus-

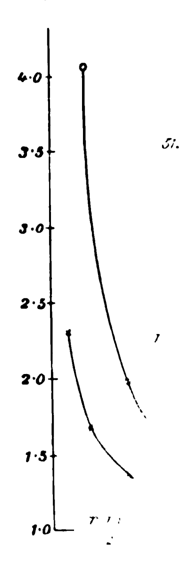
keine Konstante ist, als sie meist
verhältnissen im Galvanometerstrom.

$\frac{1}{\pi}$ aretg

haltene Dämpfungsfaktor k
stand $r = R_v + R_{Sp}$ mehr oder w
Arbeiten zu ermöglichen, wird n
Messungen für das zu benutzende
kurven abhängig vom äußeren W
indem man das Dämpfungs v e r h ä

Zahl n von Schwingungen zu k

f a k t o r dazu berechnet und den
von r als Abszisse graphisch auf



gedämpftes CARPENTIER-In
fung hat auch bei allen
geschehen.

Desgleichen empfieh
für den zu erwartenden
stände R_v nach der Gl

um für die durch di
passenden Nenn
meters mit ei
Dämpfungsfak
liegenden F
und w zu
$(B)_n$

lektrischen Strom, die Anordnung nach
ar mit Rücksicht auf die Erregerspule,
ist. Nach J. HOPKINSON, welcher diese
85. Phil. Trans. 176 II, 455), verfährt man
Teilen $C\,C$ mit einer Trennungsfuge links
D wird durch eine Feder oder durch
en Teil C des Prüfstabes gedrückt und
Felde heraus, sobald die rechte Stabhälfte
nach rechts aus dem Schlußjoch A heraus-

ne von BEHN-ESCHENBURG (ETZ 1893, 330)
Fig. 261 wiedergibt. Hier ist die Prüfspule
Eisenplatte A angebracht, die den magne-
B_1 bis B_4 und dem durch S erregten
mit Hilfe des Hebels H aus ihrer Stelle

Fugen besondere Sorgfalt zuzuwenden, damit
Anordnung der Prüfspule neben bzw. zwischen
lichen Fehler in Form von Streulinien ver-

ganz vermeiden, so wird man die Erregerspule
nebeneinander anordnen, sondern die von der
her als weit vorteilhafter bekannte Anordnung
ischen einander vorziehen.

147. Eiseninduktionen mit fester Prüfspule. Stromwendungsverfahren.

Spannungen benötigt man auch hier keinen größeren
beiden, sondern man kann die Spulen (II
einander wickeln, wobei man allerdings auch hier
zu achten und bei viereckigem Querschnitt des
innere Wickelung sehr sorgsam vor Körperschluß zu
wird man die Prüfspule für Eisenuntersuchungen mög-
tigen Fugen und Enden, bei Stäben also im mittleren
man es nicht mit geschlossenen Ringen zu tun hat, wo
die ganze Eisenlänge verteilt werden. Will man
Trennungsverhältnisse untersuchen, so wird man mög-
len an mehreren Stellen längs des Eisenweges ver-
149 Fig. 265). In allen diesen Fällen muß die Prüf-
gegenüber dem Eisen und der Erregerwickelung feststehen.
ung in II kann also nur durch Änderung des Meßfeldes
diese Änderung selbst wieder nur durch eine Änderung
rke J_I. Ein einfaches An- oder Abschalten von J_I kann
gen Werte liefern, weil die Remanenz hier sehr stark
r die Spannungserregung das Differenzfeld maßgebend ist.
bald größer bald kleiner sein als die
J_I gehört, je nach der Richtung des
anenzfeldes, während es beim Ab-

rt von N nur erhalten, indem man
rregerstromes in hinreichend kurzer
olle Kraftlinienfeld N umkehrt und in

reichende Orientierung in die Richtung der Kraftlinien des Erdfeldes große Schwierigkeiten bietet, so führt man die Messung der Gesamtintensität aus, indem man die beiden Hauptkomponenten ermittelt. Orientiert man die Achse der Erdinduktorspule genau in die Horizontale, so ergibt die Drehung um 180° die Horizontalkomponente B_s' zu

$$B_s' = \alpha \cdot \frac{R \cdot C \cdot \tau \cdot k^n \cdot 10^8}{(q)_m \cdot w \cdot \pi \cdot 2} \text{ Kraftlinien auf 1 cm}^2$$

ein Wert, der sich zu etwa 0·2 in unseren Breiten findet. Wird die Achse genau in die Vertikale orientiert, so liefert eine Halbdrehung in entsprechender

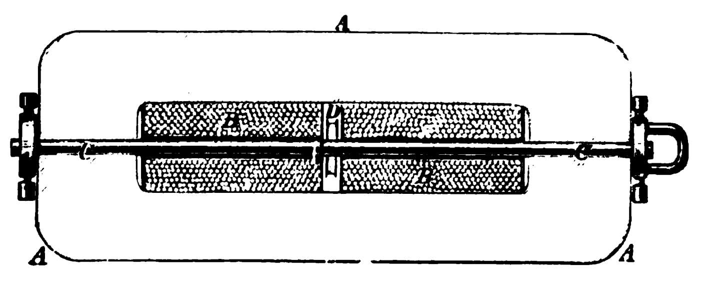


Fig. 259.

Weise den bei uns reichlich doppelt so großen Wert der Vertikalkomponente B_s''. Aus beiden rechnet sich die Totalintensität zu

$$B_s = \sqrt{(B_s')^2 + (B_s'')^2}.$$

146. **Eiseninduktionen mit Schlußjochmethode.**

Handelt es sich nicht um Luftinduktionen, sondern um Eiseninduktionen, so kann man diese Methode mit bewegter Prüfspule zwar auch in Anwendung bringen, doch wird man meist eine der folgenden Methoden mit

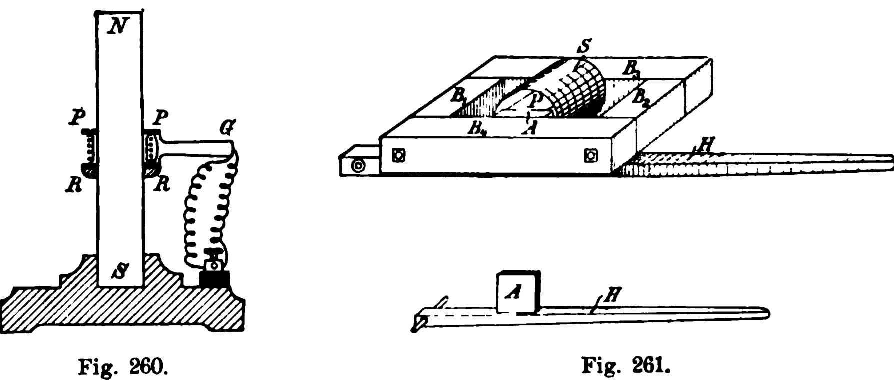


Fig. 260. Fig. 261.

feststehender Prüfspule (gegenüber dem zu untersuchenden Eisen) und kommutiertem Kraftlinienfeld vorziehen. Die Anpassung der Methode mit bewegter Prüfspule für die Untersuchung von Eiseninduktionen erfolgt entweder in der Form der Jochmethode, auch Schlußjochmethode, wie Fig. 259 andeutet, oder in der Form des Abziehens der Prüfspule möglichst von der Mitte des meist geraden Eisenstabes nach Fig. 260. Während die letzte Anordnung namentlich für Dauermagnete geeignet ist und für diese wohl die praktisch wichtigste Methode der Untersuchung darstellt (siehe 180), wird man bei Elektromagneten, also Eisenstäben mit Erregung des zeit-

weiligen Magnetismus durch den elektrischen Strom, die Anordnung nach Fig. 259 wählen müssen, und zwar mit Rücksicht auf die Erregerspule, welche in Fig. 259 mit B bezeichnet ist. Nach J. HOPKINSON, welcher diese Methode zuerst angewendet hat (1885, Phil. Trans. 176 II, 455), verfährt man hierbei so, daß der Prüfstab aus 2 Teilen $C\,C$ mit einer Trennungsfuge links neben der Prüfspule D besteht. D wird durch eine Feder oder durch Kautschukfäden gegen den rechten Teil C des Prüfstabes gedrückt und schnellt aus dem zu messenden Felde heraus, sobald die rechte Stabhälfte mit dem außen kenntlichen Griff nach rechts aus dem Schlußjoch A herausgezogen wird.

Noch etwas einfacher ist eine von BEHN-ESCHENBURG (ETZ 1893, 330) angegebene Meßanordnung, die Fig. 261 wiedergibt. Hier ist die Prüfspule bzw. Sekundärwickelung auf einer Eisenplatte A angebracht, die den magnetischen Schluß zwischen dem Joch B_1 bis B_4 und dem durch S erregten Prüfstab P bildet und zur Messung mit Hilfe des Hebels H aus ihrer Stelle entfernt wird.

In beiden Fällen ist den Fugen besondere Sorgfalt zuzuwenden, damit die verhältnismäßig ungünstige Anordnung der Prüfspule neben bzw. zwischen zwei Fugen keine zu beträchtlichen Fehler in Form von Streulinien verursacht.

147. Eiseninduktionen mit fester Prüfspule. Stromwendungsverfahren.

Will man diese Fehler ganz vermeiden, so wird man die Erregerspule und die Prüfspule nicht nebeneiander anordnen, sondern die von der Transformatorkonstruktion her als weit vorteilhafter bekannte Anordnung beider über oder auch zwischen einander vorziehen.

Wegen der geringen Spannungen benötigt man auch hier keinen größeren Respektabstand zwischen beiden, sondern man kann die Spulen (II und I) unmittelbar übereinander wickeln, wobei man allerdings auch hier auf sorgfältige Isolation zu achten und bei viereckigem Querschnitt des Eisens namentlich die innere Wickelung sehr sorgsam vor Körperschluß zu bewahren hat. Auch wird man die Prüfspule für Eisenuntersuchungen möglichst entfernt von etwaigen Fugen und Enden, bei Stäben also im mittleren Teil anordnen, wenn man es nicht mit geschlossenen Ringen zu tun hat, wo beide Wickelungen über die ganze Eisenlänge verteilt werden. Will man hingegen gerade die Streuungsverhältnisse untersuchen, so wird man möglichst schmale Prüfspulen an mehreren Stellen längs des Eisenweges verteilen (vgl. hierzu in **149** Fig. 265). In allen diesen Fällen muß die Prüfspule naturgemäß gegenüber dem Eisen und der Erregerwickelung feststehen. Die Spannungserregung in II kann also nur durch Änderung des Meßfeldes selbst erfolgen und diese Änderung selbst wieder nur durch eine Änderung der Erregerstromstärke $\bar{J}_I$. Ein einfaches An- oder Abschalten von $\bar{J}_I$ kann aber keine eindeutigen Werte liefern, weil die Remanenz hier sehr stark hereinspielt und für die Spannungserregung das Differenzfeld maßgebend ist. Dieses wird beim Anschalten von $\bar{J}_I$ bald größer bald kleiner sein als die einfache Kraftlinienzahl N, welche zu $\bar{J}_I$ gehört, je nach der Richtung des vor dem Anschalten vorhandenen Remanenzfeldes, während es beim Abschalten stets kleiner ist.

Eindeutig läßt sich daher der Wert von $\bar{N}$ nur erhalten, indem man durch Umkehren (Kommutieren) des Erregerstromes in hinreichend kurzer Zeit (vgl. $\frac{\tau}{n}$ in Fig. 258) auch das volle Kraftlinienfeld $\bar{N}$ umkehrt und in

der Prüfspule damit einen mit 2 $\bar{N}$ proportionalen Spannungsstoß hervorruft.

Kann man so die störende Wirkung der Remanenz auch in der Hauptsache vermeiden, so ist doch zweierlei zu beachten:

1. Bei der ersten Kommutierung von $\bar{J}$ kommen erfahrungsgemäß noch kleine, vielleicht auf viskose Erscheinungen zurückzuführende Abweichungen beim Ausschlag α vor, insofern auch bei stets gleichbleibendem $\bar{J}_I$ die Werte von α bei den ersten Kommutierungen weniger gut unter sich übereinzustimmen pflegen als bei den späteren. Man tut daher gut sich so zu gewöhnen, daß man vor Anschalten des Galvanometers nach jeder Stromstärkeänderung, zwecks Ermittelung eines neuen Wertes von N bzw. B, ganz schematisch einige Kommutierungen vornimmt, um den Molekülen ihre Wendungen gleichsam besser einzuexerzieren (vgl. Hdb. I, 2 in **285**).

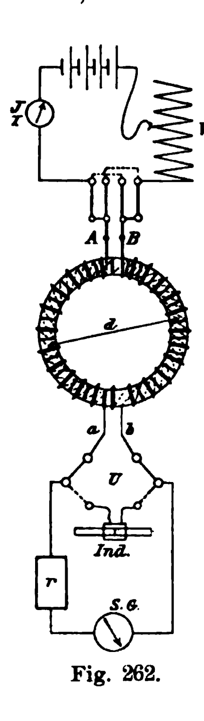


Fig. 262.

2. Die durch das Verfahren der Stromwendung erhaltenen Werte müssen im allgemeinen von den Werten, die alle vorgenannten Methoden bei demselben Eisen liefern, mehr oder weniger abweichen, da jenes Verfahren eben die magnetische Molekularreibung nach Möglichkeit eliminiert, ja mitunter vielleicht sogar die Wirkung des Waltenhofen-Phänomens (siehe Hdb. I, 2 in **283**), d. i. die Trägheitswirkung bei starker Beschleunigung der Moleküle durch sehr rasche Umkehrung ins Spiel bringt. Die früheren Methoden liefern hingegen bei allmählich von Null ansteigendem Magnetisierungsstrom die Werte der magnetischen Induktionen B, welche mit dem zugehörigen H kombiniert die aufsteigende Magnetisierungskurve ergeben. Daß diese namentlich bei niederen Werten von B erheblich von der durch das Verfahren der Stromwendung erhaltenen Kommutierungskurve abweicht, wurde schon früher (I, 2 in **293**) ausdrücklich betont.

Die Auswertung ergibt nach den Ausführungen in **144**

$$N = (B)_m \cdot q = \frac{R}{2 \cdot w} \cdot \alpha \cdot \frac{C}{\pi} \cdot \tau \cdot k^{1/\pi \operatorname{arctg} \frac{\pi}{\lambda}} \cdot 10^8 \cdot \text{Kraftlinien},$$

wobei q den Eisenquerschnitt des Prüfstabes oder -ringes bezeichnet, den die Prüfspule so nahe umschließt, daß die Kraftlinien im unmagnetischen Zwischenquerschnitt als vernachlässigbar gegenüber dem Feld im Eisen angenommen werden können.

Das Schema der Meßanordnung gleicht völlig dem früher (Fig. 50 in **27**) zur Ermittelung von Wechselinduktionskoeffizienten angegebenen.

148. Meßanordnung bei Ring-, Joch- und Isthmus-Methoden. Die Aufbringung und Anordnung der Wickelungen hängt von der gewählten Anordnung für den magnetischen Kreislauf ab. Diese kann man in 3 Hauptklassen einteilen, die noch näher im folgenden Abschnitt zu behandeln sind, und sich etwa durch die Bezeichnungen kennzeichnen lassen:

α) Ring,

β) Schlußjoch,

γ) Stab bzw. unvollständiger Eisenkreis.

Die Meßanordnung bei Ringen zeigt schematisch Fig. 262. Der primäre oder Erregerkreis (oben) mit Amperemeter zur Messung von $\overline{J}_l$ ist durch einen Stromwender an die Enden A und B der Erregerwickelung angeschlossen, die den geschlossenen Eisenring mit dem mittleren Durchmesser d umgibt. Je nach dem Ziel der Untersuchung ist dieser Eisenring aus einem massiven Eisenstück gebildet, oder aus einzelnen Blechen aufgebaut. Zwischen den Erregerwickelungen, oder auch darunter, befindet sich die Prüfwickelung, deren Enden a und b an den Schwingungsgalvanometerkreis angeschlossen sind. Ist S. G. ein Schwingungsgalvanometer mit beweglichem Magnet, also ohne Widerstandsdämpfung, so wird man zur rascheren Beruhigung der Schwingungen durch Gegeninduktion etwa einen Gauss-Induktor (Ind.) — zwei Stabmagnete mit gegeneinander gekehrten gleichnamigen Polen in einem Rohr (Glasrohr) mit darüber verschiebbarer Spule — verwenden, der mit

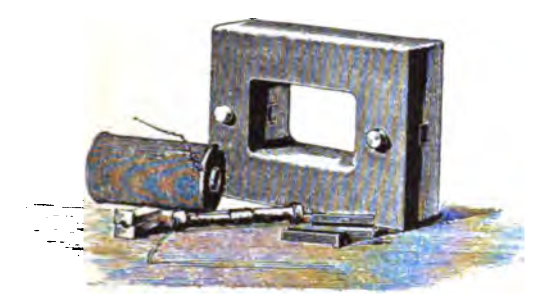
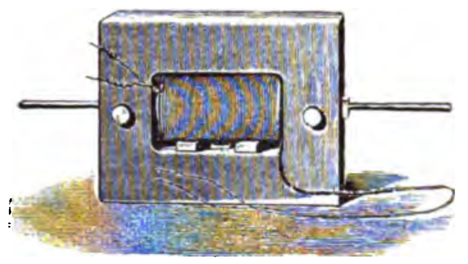



Fig. 263.

Hilfe eines Umschalters U angeschlossen wird. Bei Drehspuleninstrumenten wird man die einfachere und bequemere Widerstandsdämpfung vorziehen und parallel zu den Galvanometerklemmen einen Kurzschließer K anordnen, wie Fig. 256 zeigt. Als Stromwender kann für mäßige Werte der primären elektromagnetischen Bewegungsgröße $\overline{J}_l \cdot L_l$ ein solcher mit Unterbrechung verwendet werden, wobei nur auf die Güte der Kontakte, namentlich bei Quecksilber, zu achten und diese durch Ablesung von $\overline{J}_l$ vor und nach dem Kommutieren stets zu kontrollieren ist. Wird $\overline{J}_l \cdot L_l$ so groß, daß die Funken unbequem werden, so nimmt man einen Stromwender ohne Unterbrechung (siehe bei Fig. 52 in 27).

Bei geraden Prüfstücken wird man, um einen möglichst geschlossenen Eisenkreislauf zu erhalten, zu der Schlußjochanordnung greifen. Von den zahlreichen Ausführungen sei als Beispiel die in der Phys. Techn. Reichsanstalt verwendete abgebildet (Fig. 263). Die linke Hälfte der Figur zeigt die einzelnen auseinandergenommenen Teile und läßt unter dem massiven Schlußjoch aus Stahlguß von 18 cm Länge und 2×24 cm² Querschnitt die Magnetisierungsspule (innere Bohrung 1·5 cm, Länge 10 cm, Höhe und Breite 6 cm), sowie zwischen den Klemmbacken zum Einspannen der Eisenstäbe den Träger für die Prüfspule mit den Windungen auf seinem mittleren Teil (Länge 1·5 cm) erkennen. Die rechte Hälfte von Fig. 263 zeigt die zusammengesetzte Anordnung mit dem beiderseits herausragenden Prüfstab.

Eine besondere Anordnung zur Erzeugung sehr hoher Induktionen (B) bzw. Gefällwerte (H) stellen die Elektromagnetkonstruktionen zur Untersuchung nach der Isthmusmethode dar, die von Ewing und Low zur Untersuchung von ferromagnetischen Materialien eingeführt wurde (1887 Proc.

Roy. Soc. 42, 200, oder auch EWING M. J. Kap. VII). Die Erregerwickelung wird hier durch einen großen, außerordentlich kräftigen Elektromagnet dargestellt ähnlich dem in Hdb. I, 2 **280** Fig. 357 abgebildeten. Da hier eine Umkehrung des ganzen Feldes nicht angängig ist, so wird dasselbe nur in dem kleinen ferromagnetischen Prüfstück umgekehrt und zwar auf folgende Weise: Die konischen Enden der Polschuhe erhalten eine zylindrische Bohrung von 44 mm (vgl. Fig. 264). In diese Bohrung wird das, wie in Fig. 264 angegeben, gestaltete Prüfstück mit 44 mm äußerem Durchmesser eingesetzt. An seinem 5 mm langen und 6·5 mm hohen schmalen Mittelhals (Isthmus) werden 2 Prüfspulen angebracht, die eine (*b*) den Hals unmittelbar umgebend, die zweite (*h*) in einem genau gemessenen und von unmagnetischem Material aus gefülltem Abstand. Durch einen passenden Handgriff ist es möglich den ganzen Kern mit beiden Prüfspulen in seiner zylindrischen Bohrung um 180° zu drehen.

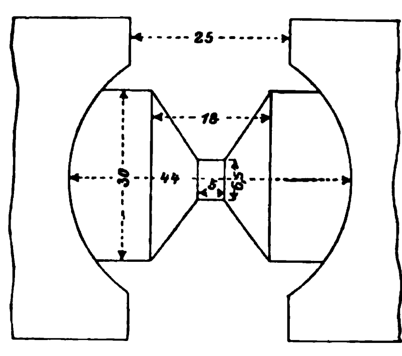


Fig. 264.

Der Induktionsstoß in *b* mißt nach der zuletzt (**147**) angegebenen Formel die Induktion B im Ferromagnetikum, die EWING und LOW bis über 45 000 Kraftlinien auf 1 cm² zu steigern vermochten. Die Differenz der Induktionsstöße in Prüfspule *h* und *b*, oder bei gleicher Windungszahl einfacher der Induktionsstoß bei Gegeneinanderschaltung von *b* und *h* mißt nach der Theorie von EWING (siehe am a. a. O. oder DU BOIS M. Kr. Seite 85) das magnetische Gefälle H innerhalb des Isthmus, das bis auf 24 500 CGS-Einheiten gesteigert wurde.

149. Prüfstäbe ohne Schlußjoch und Streuungsmessungen an Eisengestellen. Die Untersuchung von Eisenstäben ohne Zuhilfenahme eines Schlußjoches wird sich hinsichtlich der Bestimmung von B nicht wesentlich von der Anordnung mit Schlußjoch (Fig. 263) unterscheiden. Auch hier wird man die Prüfspule möglichst in der Mitte des Prüfstabes zusammendrängen und eng anschließen lassen. Die Anordnung wird sich hauptsächlich in der Form der Erregerwickelung von derjenigen in Fig. 263 unterscheiden, indem man diese möglichst langgestreckt gestaltet, um die Größe des magnetischen Gefälles im Prüfstab mit ausreichender Zuverlässigkeit berechnen zu können. Die Ausführung der Erregerspule wird also der in Fig. 238 bei den Magnetometermethoden dargestellten gleichen und aus den dort angeführten Gründen eine Länge von wenigstens $^4/_3$ des Prüfstabes zu erhalten haben.

Wichtiger als diese jetzt wohl nur noch seltener benutzte Meßanordnung mit ganz offenem Eisenkreis ist die Ermittelung der magnetischen Induktionen an magnetischen Kreisläufen mit kürzeren Luftstrecken. Dieser praktisch besonders wichtige Fall liegt bei allen Dynamokonstruktionen vor, weiterhin auch bei nahezu eisengeschlossenen Kreisen, wie Transformatorgestellen usf., welche aus Konstruktionsrücksichten Fugen aufweisen. In allen diesen Fällen wird die Ermittelung von Streuungskoeffizienten (siehe Hdb. I, 2 in **292**) von praktischer Wichtigkeit sein. Das weitaus häufigste Gleichstromverfahren, diese Koeffizienten durch Messung zu bestimmen, bedient sich nun der zuletzt besprochenen Methode der Feldkommutierung, um die Gesamtinduktion (N) in den verschiedenen, für die Untersuchung in Frage kommenden Querschnitten für dieselbe Erregerstomstärke $\overline{J}_I$ zu ermitteln. Dies geschieht

durch die Messung des Induktionsstoßes in Hilfswickelungen, die in einigen Windungen w in den Meßquerschnitten (möglichst anliegend) aufgebracht werden.

Das Vorgehen sei an einem Drosselspulengestell gezeigt; die Übertragung auf andere Fälle der Praxis ist alsdann unschwer auszuführen. Fig. 265 läßt erkennen, wie die Prüfspulen 0 bis 9 mit je 10 Windungen über den Kraftlinienweg verteilt sind, und wie der Schwingungsgalvano-

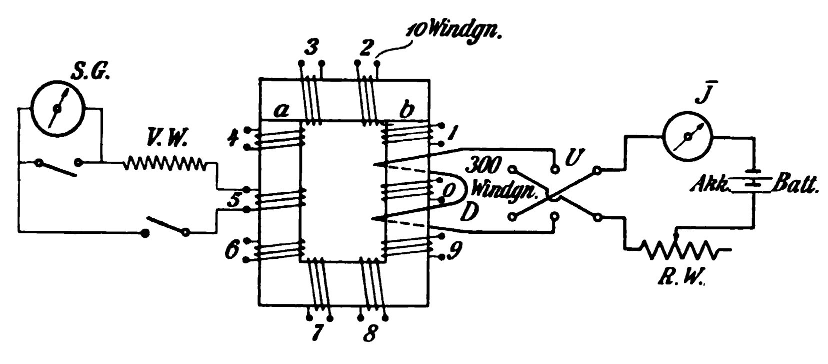


Fig. 265.

meterkreis an die Prüfspulen — hier an Nr. 5 — angeschlossen wird, endlich wie die Erregung in D mit Hilfe des Umschalters U kommutiert, durch R.W. reguliert und bei $\bar{J}$ gemessen wird. Fig. 266 liefert den Weg der mittleren Kraftlinie als Abszisse abgerollt, gleichzeitig unter Angabe der

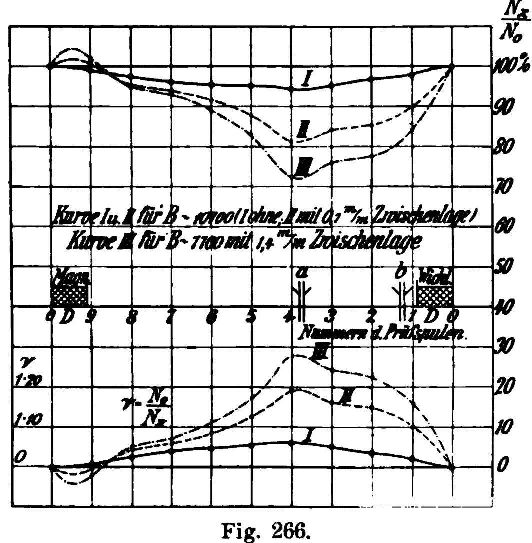


Fig. 266.

Lage der Erregerspule D mit 300 Windungen, der beiden Luftfugen a und b und der Prüfspulen 0 bis 9. Trägt man zu diesen Abszissen die Ausschläge des an die Prüfspulen angeschlossenen Schwingungsgalvanometers (vgl. Fig. 238), oder die daraus nach der Formel in **147** berechneten Kraftlinienfelder N in einem passenden Meßstab als Ordinaten auf, so liefert die erhaltene Kurve einen Anhalt für die Streuungsverhältnisse. Führt man dies für verschiedene Fugenlängen durch — in Fig. 266 bezieht sich Kurve I

auf möglichst kleine Fugenlängen beim Aufpressen der geschliffenen Trennungsflächen, hingegen II auf eine Fugenlänge bei a und b von je 0·7 mm und III auf eine solche von 1·4 mm — so kann man deutlich den Einfluß der Fuge auf die Streuung, sowie auf die Lage der maximalen Induktion im nichtunterbrochenen Eisenweg des U förmigen Untergestells verfolgen. Als Ordinaten kann man anstelle der gesamten Kraftlinienfelder N bezogen auf N_0 (im oberen Teil der Fig. 266), ebensogut, oder für manche Fälle noch besser, entweder die Differenzen, d. h. die Streufelder selbst, ausgehend von der Induktion eines Normalquerschnittes, z. B. desjenigen mit angenähert maximaler Induktion bei 0, auftragen, oder auch das Verhältnis dieses Bezugswertes N_0 zu den Kraftlinienfeldern in den anderen Querschnitten (0 bis 9), d. h. die Streuungsfaktoren ν (im unteren Teil von Fig. 266). Siehe hierzu auch am Ende von **150**.

150. Vergleichende Ausschlags- und Nullmethoden. Zu den vergleichenden Methoden übergehend, kann man, ähnlich wie bei den Methoden zur Messung elektrischer Widerstände, zwei Verfahren

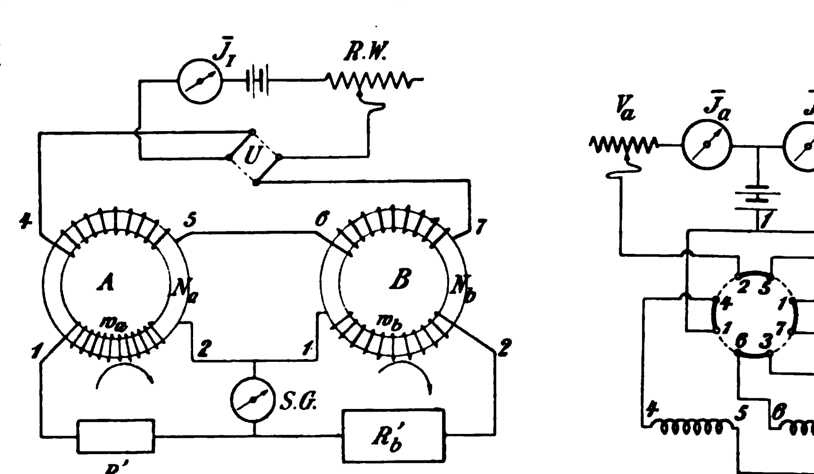


Fig. 267. Fig. 268.

unterscheiden. Bei dem einen werden die zu vergleichenden Größen zeitlich nacheinander durch Vertauschung in dieselbe Meßanordnung, hier Schwingungsgalvanometerkreis, eingeschaltet, wobei man dessen sämtliche Meßfaktoren während der ganzen Dauer der Messung als konstant voraussetzt. Bei dem zweiten werden sie gleichzeitig in einer gemeinschaftlichen Meßschaltung miteinander verglichen, meist mittels eines Null- oder Kompensationsverfahrens.

Der erste Fall läge hier vor, wenn man, wie in **144** angegeben, die Meßkreiskonstante $\left(\frac{R \cdot C_b \cdot 10^8}{w}\right)$ — bzw. $\left(\frac{R_{II} \cdot C_b \cdot 10^8}{2\, w_{II}}\right)$ bei Stromwendungsmethoden (**147**) — passend gewählt hätte und die zu vergleichenden Felder N_1 und N_2 proportional den Ausschlägen α_1 und α_2 setzen könnte, falls nötig nach Anbringung einer gesondert ermittelten Skalenkorrektion für Schwingungsausschläge.

Als N_1 würde hierbei zur Eichung der Meßanordnung, die alsdann einen direkt ablesbaren Kraftlinienzeiger darstellt, etwa eine Wechselinduktionsnormale nach Hdb. II, 1 in **17** zu verwenden sein, da diese gleichzeitig als magnetische Feldnormale bei Stromwendung dienen kann.

Als Beispiel für das Verfahren der zweiten Art sei folgende vergleichende Nullmethode angeführt, welche feststehende Prüfspulen und ein Galvanometer als Nullinstrument verwendet. Vorausgesetzt wird hierbei als normales Bezugsfeld N_a eine magnetische Normale, etwa in der Art der soeben erwähnten Wechselinduktionsnormale (Hdb. II, 1 in **17**) mit genau bekanntem Zusammenhang zwischen kommutiertem Erregerstrom $\overline{J}_I$ und zugehöriger Feldänderung um 2 $\overline{N}_a$ Kraftlinien (siehe a. a. O. Fig. 10). Für diese Vergleichsmethode stellt Fig. 267 die Meßanordnung dar. Hierin möge A die magnetische Vergleichsnormale bezeichnen, B den magnetischen Kreis mit dem zu messenden Kraftlinienfeld N_b. Werden die Erregerwickelungen von A und B mit einem Amperemeter zur Messung von $\overline{J}_I$, mit einer Gleichstromquelle (Akk.) und einem Regulierwiderstand R.W. nebst Stromwender U zu einem elektrischen Stromkreis verbunden, so wird das Kommutieren von $\overline{J}_I$ in den beiden Prüfspulen oder Sekundärwickelungen mit den Windungszahlen w_a und w_b einen angenähert gleichzeitig verlaufenden Induktionsstoß hervorrufen, der bei A durch $\int e_a \cdot dt = 2\, N_a \cdot w_a$ und bei B durch $\int e_b \cdot dt = 2\, N_b \cdot w_b$ gegeben ist. Bezeichnet man die Enden von w_a und w_b so, daß der Stoß in beiden gleichsinnig, z. B. von 1 nach 2 gerichtet ist, so würde bei zwei getrennten Stromkreisen, d. h. w_a für sich durch R_a und w_b für sich durch R_b geschlossen, der beiderseits im Uhrzeigersinn verlaufende Stromstoß durch die Gleichungen gegeben sein:

$$2\, N_a \cdot w_a = R_a \int i_a \cdot dt \text{ und } 2\, N_b \cdot w_b = R_b \int i_b \cdot dt.$$

Denkt man sich jetzt die induktionsfreien Rheostaten R_a' und R_b' so reguliert, daß $i_a = i_b$, eigentlich genauer $\int i_a\, dt = \int i_b\, dt$ wird, so wird dies dadurch augenfällig gemacht werden können, daß beim Zusammenlegen der beiden inneren Stromkreisseiten unter Einschalten eines Galvanometers S. G., wie Fig. 267 angibt, dieses keinen Ausschlag liefert als Beweis dafür, daß die Differenz zwischen i_a und i_b zu Null geworden ist. In diesem Fall, d. h. für $\int i_a\, dt = \int i_b \cdot dt$, ergibt sich durch Division der beiden Gleichungen

$$\frac{N_a}{N_b} = \frac{w_b}{w_a} \cdot \frac{R_a}{R_b} \text{ oder } N_b = N_a \cdot \frac{w_a}{w_b} \cdot \frac{R_b}{R_a}.$$

Durch Änderung von R_a und R_b und, falls nötig, auch der Windungszahlen w_a und w_b kann man sich hier, selbst bei unveränderlicher Normale A, den wechselnden Werten von B weitergehend und viel bequemer anpassen als bei den Magnetometernullmethoden oder den magnetischen Brücken in **132** bis **136**. Ist so der Meßbereich im Sekundärkreis leicht zu erweitern, so könnte nur im Primärkreis eine Schwierigkeit insofern sich ergeben, als die Erregerstromstärken nicht zueinander passen, da man hierin bei der Normale A meist etwas beschränkt zu sein pflegt.

Um auch die beiden Erregerstromstärken $\overline{J}_a$ und $\overline{J}_b$ den verschiedenen Verhältnissen anzupassen, könnte man für die beiden Primärkreise eine Stromteilung mit gesonderter Regulierung durch V_a und V_b nach Fig. 268 vornehmen, müßte aber bei Verwendung polarisierter Amperemeter für $\overline{J}_a$ und $\overline{J}_b$ zur gleichzeitigen Kommutierung von $\overline{J}_a$ und $\overline{J}_b$ einen Stromwender mit 8 Kontakten verwenden, etwa wie Fig. 268 andeutet.

Das soeben angegebene Kompensationsverfahren der Induktionsstöße in der Galvanometerbrücke (Fig. 267) zeigt eine gewisse Analogie mit dem in **39** angegebenen Verfahren der Vergleichung zweier Kapazitäten nach

W. Thomson. Diese Analogie erstreckt sich auch auf die Beeinflussung der praktischen Durchführung der Messung durch den zeitlichen Verlauf der Stromkurve bei Bewegung derselben Elektrizitätsmenge $Q = \int i\,dt$ in den beiden Stromkreisen. Was bei den Kapazitäten der verschiedene Grad der Bereitschaft (Disponibilität) der Gesamtladung Q oder auch der Rückstandsbildung bewirkt, wird hier bei Vergleichung von magnetischen Feldern der verschiedene Grad der Remanenz oder der Leichtigkeit der Kraftlinienänderung darstellen. Trotz gleicher Fläche von $\int i_a\,dt$ und $\int i_b\,dt$ kann der Kurvenverlauf und damit die Antriebsverteilung auf das Nullinstrument sehr verschieden ausfallen (Fig. 269). In solchen Fällen, wo diese Verschiedenheit erheblich ist, etwa bei Vergleich des Feldes einer ringförmig geschlossenen Normale (N_a) mit dem Feld eines offenen magnetischen Kreises (N_b), wird man daher auch bei Gleichheit von $\int i_a\,dt$ und $\int i_b\,dt$ zwei zeitlich aufeinanderfolgende gegensätzliche Antriebe oder Ausschläge erhalten.

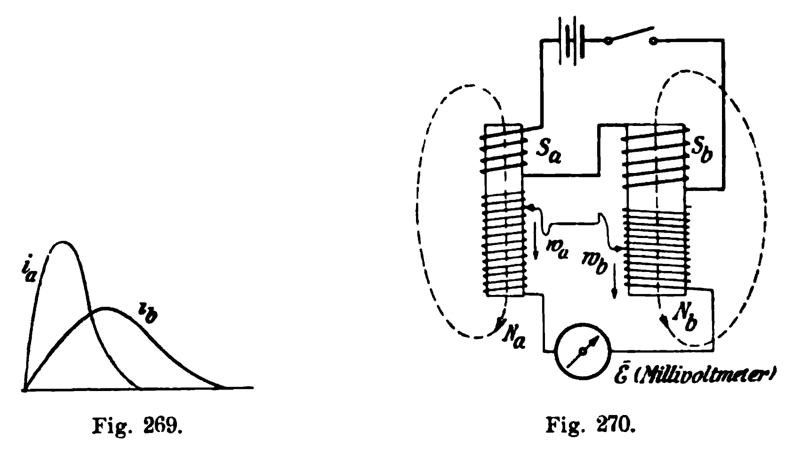


Fig. 269. Fig. 270.

Entweder muß man nun auf Gleichheit dieser Ausschläge abgleichen, oder man muß diese praktische Schwierigkeit der Messung zu überwinden suchen durch Anwendung eines Nullinstrumentes von größerer Trägheit oder Schwingungsdauer τ (vgl. **144**), bzw. von stärkerer Dämpfung, um eine bessere Integration der Antriebe herbeizuführen.

Dieses Kompensationsverfahren läßt auch leicht eine Anpassung an die in **149** angeführten Streuungsmessungen zu. Man wird in diesem Falle nur einen magnetischen Kreislauf mit einheitlicher Erregerspule haben, hingegen je zwei zu vergleichende Prüfspulen, wie in Fig. 267 angegeben, zusammenschalten und durch die Abgleichung, wie angegeben, unmittelbar den Streuungsfaktor ν ermitteln können zu

$$\nu = \frac{N_a}{N_b} = \frac{w_b}{w_a} \cdot \frac{R_a}{R_b} \text{ oder} = \frac{R_a}{R_b} \text{ für } \frac{w_b}{w_a} = 1.$$

Verzichtet man auf die Widerstandsabgleichung und setzt dafür eine Veränderung der Windungszahlen w_a und w_b, so eignet sich diese Methode nicht nur als Laboratoriumsmethode mit Schwingungsgalvanometer, sondern auch in der zuerst von Goldschmidt (ETZ 1902, 314) angegebenen Gegeneinanderschaltung von w_a und w_b als Werkstattmethode mit Benutzung eines Millivoltmeters nach Fig. 270. Nach Goldschmidt werden die Windungszahlen w_a und w_b durch Probieren „so geändert, daß beim Unterbrechen

des Erregerstromes, welcher für S_a und S_b gemeinsam gedacht ist, ein Zucken des Millivoltmeters nicht mehr bemerkbar ist". Alsdann gilt die Beziehung

$$\frac{N_a}{N_b} = \frac{w_a}{w_b}.$$

Weitere Anwendungen dieses Verfahrens, auch für Spannungsmessungen siehe a. a. O.

Diese Methode ohne Stromwendung kann natürlich nur für magnetische Kreise mit verhältnismäßig geringer Remanenz, also bei größeren Luftzwischenräumen angenähert richtige Resultate geben, wie aus den Ausführungen in **147** ohne weiteres folgt, da für den Induktionsstoß, der zur Abgleichung benutzt wird, nur die Zahl der wirklich verschwindenden Kraftlinien maßgebend ist.

b) Wechselnde Induktion mit Voltmeter.

151. **Messung der Wechselspannung in relativ zum Feld bewegten Spulen.**

Wechselt die Induktion sowohl in Richtung als Größe periodisch, so daß in dem Leiter der Prüfspule eine periodische Wechselspannung induziert wird, so muß anstelle des Schwingungsgalvanometers ein passender Wechselspannungszeiger treten. Bei hinreichender Größe des Produktes aus $(\omega \cdot \tilde{N})$, d. i. der sekundlich schneidenden Kraftlinien, und der Windungszahl w_{II} der Prüfspule, wird die Spannung

$$\tilde{E}_{II} = \omega \cdot \tilde{N}_I{}^{II} \cdot w_{II} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

am besten durch ein passendes Voltmeter gemessen.

Auch hier können wir wieder zwei Fälle, mit bewegter Prüfspule einerseits, mit feststehender andererseits, unterscheiden.

Von diesen Fällen wird praktisch der erste nur dann in Frage kommen, wenn die in dem bewegten Leiter periodisch wechselnde Induktion durch Bewegen einer geeigneten Leiteranordnung in einem stationären Gleichfeld erfolgt. Diese Anordnungen sind zwar noch nicht zu Apparaten eigens für Meßzwecke ausgebildet worden, liegen aber um so häufiger bei den Dynamos, sowohl Gleich- als Wechselstromdynamos, vor, wo sie für die Messung von Magnetfeldern mit herangezogen werden, namentlich bei Aufstellung von Leerlaufcharakteristiken (siehe in **80**). Die Ankerwickelung mit bestimmter Drahtzahl und Windungsquerschnitt stellt also hier zugleich die Prüfspule oder Sekundärwickelung vor, welche gestattet, aus diesen Daten und der Tourenzahl das Ankerfeld, d. i. die das Ankereisen durchsetzende Kraftlinienzahl bei Abwesenheit merklicher Ankerreaktion, zu bestimmen. Diese Messung der Leerlaufspannung, welche bei Wechselstrommaschinen als Wechselspannung nach der obigen Gleichung mit einem passenden Wechselstromvoltmeter (vgl. **2** bis **4**), bei Gleichstrommaschinen hingegen nach Umklappen und Summieren der ursprünglichen phasenverschobenen Wechselspannungswellen mit Gleichspannungszeigern erfolgt, braucht aber hier nicht näher behandelt zu werden (siehe hierüber in **77 ff.** sowie Bd. III und IV).

152. **Messung von Wechselfeldern. Streuungsmessungen.**

Die Meßanordnungen mit ruhender Prüfspule bedürfen auch keiner besonderen Behandlung, da ihnen allen das Transformatorprinzip zugrunde liegt, und sie deshalb bereits früher, teils bei den Induktionskoeffizienten (siehe in **28**), teils bei den Messungen an Transformatoren (**108**) behandelt wurden. Es sei deshalb an dieser Stelle nur nochmals daran erinnert, daß in die Kraftliniengleichung

$$\tilde{E}_I = \omega \cdot \tilde{N}_I \cdot w_I$$

bei Messung von der Primärspule aus (vgl. **143**) und

$$\tilde{E}_{II} = \omega \cdot \tilde{N}_I^{II} \cdot w_{II}$$

bei Messung durch eine gesonderte Prüfspule oder Sekundärwickelung stets die Umsetzungsspannung, d. i. bei $\tilde{E}_I$ die Gegen-*EMK* der Selbstinduktion und bei $\tilde{E}_{II}$ die durch Wechselinduktion in II erzeugte *EMK*, einzusetzen ist. Da zur Messung aber nur die Klemmenspannung zur Verfügung steht, so muß zur Ermittelung von $\tilde{E}_I$ aus ${}_I\tilde{E}_g$ die bei Fig. 35 in **16** angegebene Reduktion durch geometrische Subtraktion von $\tilde{J}_I \cdot R_I$ vorgenommen werden, während an der gemessenen sekundären Klemmenspannung ${}_{II}\tilde{E}_g$ eine entsprechende Addition von $\tilde{J}_{II} \cdot R_{II}$ zu erfolgen hätte. Im letzteren Fall hat man es aber fast immer in der Hand, dieses Produkt $\tilde{J}_{II} \cdot R_{II}$ so klein zu machen, daß der Unterschied zwischen $\tilde{E}_{II}$ und ${}_{II}\tilde{E}_g$ vernachlässigbar klein ist, sei es, daß bei Benutzung eines stromverbrauchenden Voltmeters, etwa Hitzdrahtvoltmeters, der Ohmsche Widerstand R_{II} der Sekundär- oder Prüfspule hinreichend klein ist, sei es, daß man in den Fällen, wo R_{II} einen höheren Wert besitzt, $\tilde{J}_{II}$ entsprechend kleiner macht, etwa durch Wahl eines elektrostatischen Voltmeters zur Messung von $\tilde{E}_{II}$. Jedenfalls ist aber eine Überprüfung durch Überschlagsrechnung nach dieser Richtung erforderlich, weil sonst in extremen Fällen hierdurch große Fehler entstehen können, ganz abgesehen davon, daß eine verhältnismäßig hohe Strombelastung der Prüfwickelung, wie sie bei Schwachstromapparaten oder entsprechenden Meßanordnungen durch den Voltmeterstrom, z. B. bei Hitzdrahtinstrumenten, möglich ist, eine merkliche Erhöhung des Spannungsabfalles $\tilde{J}_{II} \cdot R_{II}$ durch Streuungswirkung oder $\tilde{J}_{II} \cdot \omega \cdot L_{II}$ (siehe hierzu **109** und **4**) zur Folge haben kann. Daß außerdem auch hier auf eine möglichst zwangläufige magnetische Verkettung zwischen w_I und w_{II} zu achten ist, um $\tilde{N}_I^{II}$ möglichst nahe gleich $\tilde{N}_I$ zu machen, ist für die Messung von Eiseninduktionen nach dem früher (**143**) Gesagten einleuchtend.

Bei Streuungsmessungen hingegen, welche bei unterteiltem Eisenquerschnitt in ganz entsprechender Weise ausgeführt werden können, wie in **149** angegeben, wird man nicht auf diesen Punkt zu achten haben, wohl aber auf den vorher erwähnten, insofern hier

$$\tilde{E}_I : \tilde{E}_{II} = (\omega \cdot \tilde{N}_I \cdot w_I) : (\omega \cdot \tilde{N}_I^{II} \cdot w_{II}) = (\tilde{N}_I \cdot w_I) : (\tilde{N}_I^{II} \cdot w_{II}),$$

d. h. die Umsetzungsspannungen auf beiden Seiten in Beziehung zu setzen sind. Im übrigen bietet die Ausführung dieser Messungen mit Wechselstrom, soweit nicht überhaupt eine Messung der Kurzschlußspannung (**109**) in Anwendung kommt, gegenüber der Gleichsstrommessung mancherlei Vorteile. Bei unterteiltem Eisenquerschnitt wird man sie wegen des Ersatzes der immerhin subtilen Schwingungsgalvanometerablesungen durch Voltmeterablesungen vielfach wählen, namentlich dann, wenn man Grund hat, anstelle einer Laboratoriumsmethode eine Werkstattmethode zu bevorzugen.

III. Ermittelung der magnetischen Widerstandsgröße und des magnetischen Materialkoeffizienten μ.

1. Der magnetische Widerstand und seine Messung.

158. Allgemeines. Unterschiede gegenüber dem elektrischen Widerstand.

Die magnetische Widerstandsgröße S_m einer Kreislaufstrecke baut sich in entsprechender Weise wie der elektrische Widerstand $R = \frac{l}{q \cdot k}$ aus den

Dimensionen l und q, sowie aus einem Materialkoeffizienten k bzw. μ auf, der elektrisch als spezifisches Leitvermögen k, magnetisch als Permeabilität μ bezeichnet wird (siehe hierzu Hdb. I, 1 in **115** und I, 2 in **209**, **290**). Bei der Widerstandsbestimmung liegen magnetisch die Verhältnisse insofern einfacher gegenüber den elektrischen, als die überwiegende Mehrzahl aller Materialien und Medien einen Materialkoeffizienten μ besitzt, der praktisch nur unwesentlich von 1 abweicht, so daß in allen diesen Fällen sich die Widerstandsmessung nur auf die Ausmessung der Dimensionen l und q zu beschränken scheint, um S_m in der CGS-Einheit zu erhalten, die gleichzeitig auch die technisch benutzte Einheit darstellt, aber bisher noch mit keinem allseitig angenommenen und gebrauchten Namen — entsprechend Ohm für die technische Widerstandseinheit — belegt worden ist. In Wirklichkeit wird diese größere Einfachheit beim magnetischen Widerstand aber mehr als aufgewogen durch die Unmöglichkeit einer ausreichenden Isolierung der Kreislaufbahnen in magnetischer Beziehung (I, 2 in **290**). Die verhältnismäßig leichte Isolierung der elektrischen Strombahnen, oder das Zusammenhalten aller Stromlinien in der Leiterbahn im Gegensatz zu der Streuung der magnetischen Kraftlinien infolge der merklichen magnetischen Durchlässigkeit aller Medien, auch der sogenannten unmagnetischen, verleiht dem elektrischen Widerstand ein ungleich größeres Maß von Bestimmtheit gegenüber dem magnetischen und damit auch eine wesentlich größere Bedeutung in der elektrischen Meßtechnik, als sie der magnetische Widerstand als Meßgröße in der magnetischen besitzt.

Dieser Umstand erklärt es ferner, warum auch für Kreislaufstrecken mit dem Materialkoeffizienten $\mu = 1$ in den seltensten Fällen eine Messung der Widerstandsgröße S_m mit ausreichender Annäherung durch einfache Ausmessung von l und q möglich ist. Nur bei Strecken mit verhältnismäßig kleiner Länge l zu ihrem Querschnitt q, welche außerdem beiderseits an einen längeren Eisenweg anschließen, ist diese Art der magnetischen Widerstandsmessung anwendbar, etwa bei dem Luftraum von Dynamos zwischen Polschuh und Anker; aber selbst da muß man sich, um die Werte der Wirklichkeit genügend nahe zu bringen, noch mehr oder weniger empirischer Streuungskoeffizienten bedienen, welche die Streuung, d. h. hier die Verkleinerung des aus l und q gerechneten Widerstandes durch die magnetischen Nebenschlüsse des umgebenden Luftraumes, berücksichtigen.

Zur genaueren Bestimmung von S_m ist man daher auch in solchen Fällen auf die Messung des Gesamtwertes von S_m angewiesen, weil die Ausmessung von l und q mit dem Maßstab nicht die reduzierten, oder auch die für den Kraftlinienausgleich maßgebenden mittleren Werte $(l)_m$ bzw. $(q)_m$ liefert, die erst rückwärts aus dem tatsächlichen Wert von S_m in CGS-Einheiten eine Bestimmung erfahren können.

154. Experimentelle Ermittelung. Verhältnis zum Selbstinduktionskoeffizienten.

Die experimentelle Ermittelung oder die Messung von S_m läßt im allgemeinen auch die bei den übrigen Größen unterschiedenen zwei Hauptverfahren zu, nämlich die absolute Messung durch Zurückführung auf Größen anderer Dimensionen, hier durch die Messung des Kraftlinienfeldes N und der MMK bzw. magnetischen Spannung (Fallhöhe) D, und die relative Messung durch Vergleichung mit bekannten magnetischen Widerständen, wie sie z. B. durch die magnetischen Brücken (**134** bis **136**) ermöglicht wird. Wenn in diesem Falle die Methoden der absoluten Messung weitaus wichtiger sind und verhältnismäßig häufiger zur Anwendung gelangen als bei den

Messungen der elektrischen Widerstandsgröße, so liegt das in erster Linie daran, daß der magnetische Widerstand der hier praktisch allein in Frage kommenden Eisennormalen, etwa Stäben aus Norweg-Eisen von abgestuften Querschnitten (vgl. **135**), keine Normalen im Sinne der elektrischen Widerstandsnormalen sind, da ihr Widerstand S_m nicht konstant bzw. unabhängig von der Ausgleichstärke ist, sondern mit μ bzw. B oder N variiert, ein erschwerender Umstand, der durch die magnetische Reibungserscheinung und die dadurch bewirkte Mehrdeutigkeit der μ-Kurve noch eine weitergehende Komplizierung erleidet.

Neben diesem prinzipiellen Unterschied in dem meßtechnischen Vorgehen wird man vom praktischen Standpunkt aus unterscheiden: Messung magnetischer Widerstände von

a) eisenfreien magnetischen Kreisen bzw. Spulen;
b) gemischten Kreislaufwegen;
c) Eisenstäben bzw. -strecken mit gleichförmigem Querschnitt.

Nicht unnötig erscheint der nochmalige Hinweis, daß die magnetische Widerstandsgröße S_m für den vollen Kreislauf in naher Beziehung zum Selbstinduktionskoeffizienten L der Erregerwickelung steht, insofern aus der Definition (**14**) des $L = \frac{N \cdot w}{\bar{J}_I}$ und aus der Gleichung für den Gesamtwiderstand des magnetischen Kreislaufes

$$S_m = \frac{D}{N} = \frac{\bar{J}_I \cdot w \cdot 1{\cdot}257}{N}$$

die Beziehung folgt:

$$S_m = \frac{1{\cdot}257 \cdot w^2}{L} \text{ oder } L = \frac{1{\cdot}257 \cdot w^2}{S_m}.$$

Die Bestimmung von L nach einer der früher (**15 ff.**) angegebenen Methoden würde bei Kenntnis der Windungszahl w somit auch eine Bestimmung von S_m einschließen und umgekehrt; allerdings darf hierbei nicht übersehen werden, daß bei eisenhaltigen Kreisen und bei Bestimmung mit Wechselstrom der in **14** als ideeller Selbstinduktionskoeffizient L_μ bezeichnete Wert für L einzusetzen wäre, und daß bei eisenfreien Kreisen in den meisten Fällen die relative Streuung (vgl. I, 1 in **106**), d. h. die Variation von N innerhalb der einzelnen Windungen die Einführung eines mittleren Feldes $(N)_m$ notwendig macht, ebenso wie sie Korrektionen an der einfachen Grenzformel für L (I, 2 in **182**) bedingt. Dort aber, wo die Dimensionen der Wickelung eine ausreichend zutreffende Berechnung von L zulassen, ist auch gleichzeitig der Wert von S_m nach der obigen Beziehung mit berechnet.

155. **Eisenfreier magnetischer Kreislauf. Reduzierte Widerstandslängen.**

Die Messung von S_m bei eisenfreien Wickelungen bzw. magnetischen Kreisen wird also zur Ermittelung des totalen Kraftlinienfeldes am besten durch eine Bestimmung des Selbstinduktionskoeffizienten $L = \frac{(N)_m \cdot w}{\bar{J}_I}$ nach einer der in **15 ff.** angegebenen Methoden erfolgen. Alsdann ist das resultierende $S_m = \frac{1{\cdot}257 \cdot w^2}{L}$. Hat sich so z. B. aus den Wechselstromgrößen (Fig. 30 in **15**) für eine auf Holz gewickelte Spule von 2110 Windungen bei einer Höhe der Spule von 19·3 cm, einem äußeren Wickelungsdurchmesser von 11·8 cm der Selbstinduktionskoeffizient zu 80·0 Mh ergeben,

so folgt nach der obigen Formel der magnetische Widerstand des ganzen Kreislaufes zu

$$S_m = \frac{1{\cdot}257 \cdot 2110^2}{80 \cdot 10^6} = 0{\cdot}070 \; CGS\text{-Einheiten.}$$

Ist so S_m ermittelt, so kann man aus der Formel

$$S_m = \frac{(l)_m}{(q)_m},$$

je nachdem man für l oder q einen bestimmten Wert einsetzt, $(q)_m$ bzw. $(l)_m$ als äquivalenten oder auch reduzierten Wert des zugehörigen Querschnitts bzw. der zugehörigen Länge berechnen.

Bei einer eisenfreien Spule von gleichförmigem mittlerem Windungsdurchmesser $(d)_m = \frac{d_i + d_a}{2}$ würde man jedenfalls das zweite Verfahren vorziehen und im obigen Fall etwa, für $(d)_m = 8{\cdot}1$ cm, $(q)_m = \frac{\pi}{4}\,(q)_m{}^2$ zu $51{\cdot}7$ cm² einsetzen. Hierzu würde sich alsdann als reduzierte Kraftlinienlänge — für ein homogenes Feld ohne Streuung, das jenem stark streuenden und im Querschnitt sehr veränderlichen Feld äquivalent wäre — der Wert $(l)_r = S_m \cdot (q)_m = 0.070 \cdot 51{\cdot}7 = 3{\cdot}62$ cm ergeben. Sinngemäßer und schließlich auch praktisch wichtiger als im vorliegenden Fall ist eine solche Reduktion bei gemischten magnetischen Kreisen, bei welchen der Eisenquerschnitt als $(q)_m$ eingeführt wird.

156. Eisenhaltiger Kreislauf. Zerlegung bei Reihenschaltung.

Ist bei einem solchen Kreis der gesamte magnetische Widerstand S_m durch Messung ermittelt, entweder auch über den Zwischenwert des Selbstinduktionskoeffizienten, oder hier wohl häufiger durch die Messung der beiden Größen N, etwa im mittleren Eisenquerschnitt durch eine der unter II angegebenen Methoden, sowie der Gesamtgröße $D = 1{\cdot}257\, J_I \cdot w$, so muß zunächst eine Teilung von S_m in den Eisenwiderstand S_m' und den Luftwiderstand bzw. Zwischenwiderstand S_m'' (Widerstand des „Interferrikums") vorgenommen werden. Die Bestimmung von S_m' aus den Eisendimensionen und dem mehr oder weniger genau ermittelten Materialkoeffizienten μ (siehe unten) wird gewöhnlich hinreichend genau erfolgen können, namentlich in den sehr häufigen Fällen, wo S_m' klein gegenüber S_m'' ist. Hat man so $S_m'' = S_m - S_m'$ ermittelt, so verfährt man mit S_m'', falls erwünscht, ähnlich wie oben. Hierbei wird man mit Hilfe der Formel $S_m'' = l'' : q''$ durch Einsetzen eines bestimmten l ein äquivalentes $(q)_m$ in der Regel dann berechnen, wenn l klein gegenüber q, etwa wie bei Lufträumen zwischen Polschuh und Anker; hingegen wird man umgekehrt zu einem bestimmten q das reduzierte l_r berechnen, wenn es sich um einen längeren Eisenweg, etwa Eisenstab, mit homogenem Querschnitt handelt. Auch hier stellt, wie oben, diese reduzierte Länge l_r die Luftsäule von demselben Querschnitt q wie das Eisen dar, welche ohne Ausbreitung oder Streuung der Kraftlinien denselben äquivalenten magnetischen Widerstand liefern würde, wie alle Streu- oder Nebenschlußbahnen.

Die Ermittelung des magnetischen Widerstandes von Eisenwegen wird zwei Fälle unterscheiden lassen: Entweder ist der magnetische Kreis, wie im letzten Fall, aus Eisen- und Luftstrecken zusammengesetzt, oder der Eisenweg ist in sich geschlossen. In beiden Fällen wird man bei Eisenuntersuchungen, um Komplizierungen zu vermeiden, die Anordnung so

treffen, daß die Eisenstrecke mit homogenem Querschnitt ausgeführt ist, um eine möglichst homogene Feldverteilung (B) im Eisen zu erhalten. Der erste Fall des gemischten Kreislaufes schließt hierbei an den vorhergehenden Fall an, insofern bei diesem eine Berechnung von S_m' vorausgesetzt wird. In beiden Fällen wird, da $S_m' = \frac{l'}{q' \cdot \mu'}$ außer dem veränderlichen μ' des Eisens nur noch die unschwer zu bestimmenden Dimensionen l' und q' des Eisenweges enthält, hauptsächlich die Aufstellung der μ-Kurve nötig werden. Da nun diese aus der reinen B, H-Kurve abgeleitet werden muß (siehe hierzu Hdb. I, 2 in **290**), so läuft die Messung des magnetischen Widerstandes von Eisenwegen auf die experimentelle Aufstellung der Reinkurve für den Zusammenhang von spezifischer Induktion B im Eisen und von magnetischem Gefälle H bzw. H' im Eisen hinaus. Die Bestimmung des letzteren schließt (entsprechend der Gleichung $S_m' = D' : N$) bei gemischtem Kreislauf eine Zerlegung der leicht meßbaren, gesamten MMK in zwei Teile ($D = D' + D''$) ein nach einem der früher (**127**) angegebenen Verfahren.

2. Aufstellung von B, H-Kurven und μ-Kurven.

157. Reihenfolge der Meßverfahren. Ringmethode. Die Methoden und Meßanordnungen zur Ermittelung der magnetischen Induktion B im Eisen wurden bereits im Abschnitt II behandelt, das Verfahren zur Ermitteluug des magnetischen Gefälles H bzw. H' wurde im Abschnitt I besprochen. Unter Hinweis auf diese Ausführungen würde es sich hier also nur noch um einige zusätzliche Bemerkungen handeln, die sich auf die Vereinigung beider Meßverfahren in den für die Aufstellung von B, H-Kurven geeigneten Meßanordnungen beziehen. Als Einteilung und Reihenfolge für die letzteren wurde hier gewählt:

α) Ringmethoden;
β) Schlußjochmethoden;
γ) Luftschlitzmethoden;
δ) Stabmethoden oder Methoden für ungeschlossene magnetische Kreise.

Die Wahl der Reihenfolge wird bedingt durch die zunehmende Größe der Scherung, welche die erhaltene Rohkurve für B, H zur Überführung in die Reinkurve benötigt. Im allgemeinen wächst auch hiermit die Schwierigkeit einer zuverlässigen Zerlegung der magnetischen Antriebskraft D in D' und D'' oder der Ermittelung des wirklichen magnetischen Gefälles H im Eisen, das die Abszissenwerte liefert, zu den nach Abschnitt II bestimmten Ordinatenwerten B der B, H-Kurve für das Eisen.

Liegt das zu prüfende Eisen in Ringform vor, so sind nur die Induktionsmethoden verwendbar, und zwar für die Aufstellung der Gleichstromwerte in Gestalt der Kommutierungskurve (**147**) die in **148** Fig. 262 angegebene Meßanordnung, während die Aufstellung der Kurve für die Wechselstrompermeabilität $\tilde{\mu}$ die in **171** Fig. 279 angegebene Wechselstrommeßanordnung erfordert, deren Grundlagen und Grundbegriffe eingehender an anderer Stelle (I, 2 in **301**) behandelt sind.

Bei der Auswertung der Beobachtungen mittels der Gleichstrommethode, d. i. im Erregerkreis $\bar{J}_I$ und im Prüfspulenkreis $\alpha = \frac{2 \cdot \bar{N} \cdot w_{II} \cdot \pi}{R_{II} \cdot \bar{C} \cdot \tau \cdot k^n \cdot 10^8}$, ist hier auf folgende zwei Punkte zu achten, welche Korrektionen oder Schwierigkeiten verursachen, die in der Ringform begründet liegen, und für Ringe

mit kleinerem mittlerem Durchmesser d und größerer Breite b sehr erheblich werden können, so daß Verhältnisse von $\left(d - \frac{b}{2}\right) : \left(d + \frac{b}{2}\right)$ oder von $d_i : d_a < 0{\cdot}6$ möglichst zu vermeiden sind. Da $D = 1{\cdot}257\,\bar{J}_I \cdot w_I$ für alle kreisförmigen Eisenwege denselben Wert besitzt, hingegen die Länge l_i der innersten Ringfaser oder Kraftlinienbahn merklich von l_a (der äußersten) abweicht, so wird das Eisengefälle $H = \frac{D}{l}$, welches hier allerdings keiner Zerlegung von D bedarf, doch für l_i merklich größer sein als für l_a. Darum wird auch die Verteilung des durch α gemessenen Gesamtfeldes N über den Eisenquerschnitt q nicht homogen sein; vielmehr werden die Abweichungen zwischen B_i gegenüber B_a um so größer sein, je rascher sich die Magnetisierungskurve des Eisens bei dem Gefällunterschied $H_i - H_a$ ändert. Die Ableitung für den magnetischen Widerstand eines solchen Kreisringes (siehe Hdb. I, 2 in **291**) zeigt ferner, daß für $(l)_m$ genauer nicht der mittlere Umfang $\frac{l_a + l_i}{2}$, sondern der „harmonische" Umfang $\frac{l_a - l_i}{ln\left(\frac{l_a}{l_i}\right)}$ einzusetzen ist.

Für $d_i : d_a > 0{\cdot}6$ bleibt diese Korrektion kleiner als 2 %. So beträgt z. B. für $d = 6{\cdot}75$ cm und $b = 1{\cdot}25$ cm, d. h. für $d_i : d_a = 6{\cdot}12 : 7{\cdot}38 = 0{\cdot}83$, der harmonische Umfang 20·95 cm gegen einen mittleren Umfang von 21·2. Alsdann wird auch bei Einsetzung von $(B_m) = \frac{N}{q}$ die Abweichung der so erhaltenen B, H-Kurve und der daraus unmittelbar abzuleitenden Kurve für $\mu = B : H$ von der Differentialkurve für eine einzelne Ringfaser sich in mäßigen Grenzen halten.

Bei der Untersuchung massiver Ringe empfiehlt es sich ferner, kein Schwingungsgalvanometer von kleinerer Schwingungsdauer — möglichst nicht unter 10 Sekunden — zu verwenden, weil hier die Umkehrung des Feldes (infolge einer Art zeitlicher magnetischer Schirmwirkung von äußeren und inneren Schichten) etwas längere Zeit erfordert (vgl. hierzu I, 2 in **294**). Auch ist zu beachten, daß solche Ringe, welche durch Zusammenschweißen der Enden gebildet wurden, leicht in der Schweißfuge eine Inhomogenität der Permeabilität zeigen, so, daß die Schweißfuge nach Art einer sehr kurzen Luftfuge wirkt und einen Sprung im Gefälle H verursacht, der das errechnete H für das Eisen etwas zu groß ausfallen läßt.

Die Untersuchung unterteilter Ringe mit Wechselstrom zur Messung von Wechselstrompermeabilitäten verlangt eine Meßanordnung, die sich völlig mit der in **171** zur Messung der Eisenverluste mit Wechselstrom angegebenen deckt. Da beide Untersuchungen verbunden zu werden pflegen, so ist das Erforderliche an jener Stelle angegeben.

158. **Schlußjochmethoden.**

Bei den Schlußjochmethoden, von denen die gebräuchlichsten Meßanordnungen schon in **148** besprochen wurden, ist eine völlige Übereinstimmung der aus $B = N : q$ und $H = (1{\cdot}257 \cdot \bar{J}_I \cdot w_I) : l$ erhaltenen Rohkurve mit der gesuchten Reinkurve nicht zu erwarten, wenn für q der Nettoquerschnitt und für l die Länge des Prüfstabes zwischen den inneren Jochgrenzen (vgl. Fig. 263) eingesetzt wird. Dieses l müßte nämlich, um den richtigen Wert von H, d. i. des magnetischen Nettogefälles im Prüfstab, zu ergeben, eine virtuelle Verlängerung erfahren, gewissermaßen eine reduzierte Länge l_r'' des magnetischen Widerstandes, welchen weniger das Joch selbst als

namentlich die trotz sorgfältiger Einklemmung verbleibenden Trennungsfugen zwischen Stab, Klemmbacken und Joch, sowie die Ausbreitungsbahnen aus dem geringen Prüfstabquerschnitt in den großen Jochquerschnitt besitzen.

Die Berücksichtigung dieser Korrektion pflegt aber hier nicht direkt in Form einer virtuellen Verlängerung von l um l_r'' zu erfolgen, sondern einer gleichwertigen Reduktion der gesamten MMK, d. i. $D = 1{\cdot}257\, \overline{J}_l \cdot w_l$ um D'' oder, anders ausgedrückt, in Form einer Scherung der Rohkurve um den Betrag $D'' : l = H''$. Die genauere Ermittelung der Scherungslinie eines solchen Apparates bietet aber ziemliche Schwierigkeiten und läßt sich eigentlich nur auf dem Vergleichswege durchführen, indem man für denselben Eisenstab die Bruttokurve ermittelt und die Nettokurve nach einem anderen Verfahren aufnimmt, das eine zuverlässigere Berücksichtigung des Scherungsbetrages zuläßt, wie er für eine Reihe von Apparaten von der Phys. Techn. Reichsanstalt ermittelt worden ist (vgl. **127**, sowie Fig. 247 und 252).

Andernfalls kann man nur durch geeignete Jochkonstruktion danach trachten, diesen Betrag H'' überhaupt sehr klein gegenüber $H' = H - H''$ zu machen, die Korrektion H'' auf Grund eines rechnerischen Überschlages und Schätzung des Fugenabstandes anzubringen und die noch verbleibende Differenz auf sich beruhen zu lassen; oder man kann unter Verzicht auf genauere absolute Bestimmungen mit Hilfe des Joches sich auf mehr vergleichende Messungen der zu prüfenden Eisenstäbe beschränken.

Bei den Ergebnissen der in **146** angegebenen Schlußjochausführungen ist noch zu beachten, daß die in Fig. 259 und 261 angeführten Apparate mit bewegter Prüfspule und Messung des einfachen Kraftlinienbetrages bei allmählich anwachsendem Erregerstrom $\overline{J}_l$ und vorher erfolgter Entmagnetisierung des Prüfstabes (**132**) die aufsteigende Magnetisierungskurve (B, H-Kurve) liefern, und daß diese ebenso wie die daraus abgeleitete μ-Kurve in den unteren Teilen merklich von der Kommutierungskurve für B, H bzw. μ abweichen, wie sie die in Fig. 263 angegebenen Anordnungen mit fester Prüfspule, Stromwendung und Messung des doppelten Kraftlinienbetrages liefern.

159. Luftschlitzmethoden. Die Meßanordnungen und Apparate, welche einen Luftschlitz zur Messung von B benötigen und aus dieser Luftinduktion B_0 auf die Eiseninduktion B schließen, wie der Drehspulenapparat in Fig. 244, die magnetische Wage in Fig. 251, und der Wismutapparat in Fig. 254 und 255, sind von vorn herein, d. h. auch zur Ermittelung dieser B-Werte, auf empirische Eichung angewiesen mit Hilfe von Normalstäben, deren B, H-Kurven nach einer absoluten Methode bestimmt wurden. Außerdem gilt das im vorstehenden Artikel über die Scherung bzw. die Zerlegung von D in $D' + D''$ Gesagte in noch höherem Maße bei allen diesen Luftschlitzmethoden, da der Scherungsbetrag hier in fast allen Fällen so erheblich ist, daß bei Aufstellung von B, H-Kurven mit diesen Apparaten die Überführung der Rohkurve in die Reinkurve die Kenntnis des Scherungsbetrages bzw. der Scherungslinie unerläßlich macht.

Der Drehspulenapparat in **138** liefert nach vorausgegangener sorgfältiger Entmagnetisierung des Probestabes bei allmählich ansteigendem Erregerstrom $\overline{J}_l$ die aufsteigende (rohe) Magnetisierungskurve. Die einzelnen Punkte zu ihrer Konstruktion werden bei richtig eingestelltem Hilfsstrom (J_h vgl. **138**) durch Ablesung an der nach Kilolinien geeichten B-Skala (Ordinatenwerte) und durch Ablesung des Erregerstromwertes $\overline{J}_l$ (Abszissen-

werte $H = 100\,\overline{J}_l$) erhalten. Von diesen so erhaltenen H-Werten ist zur Ableitung der gesuchten Reinkurve der Scherungsbetrag H'', wie ihn abhängig von B die aufsteigende Scherungslinie der Fig. 247 liefert, abzuziehen. Über die Benutzung des Apparates zur Ermittelung der Hystereseschleife siehe in **164**.

Ganz entsprechend hat man vorzugehen, um mit Hilfe der in Fig. 251 abgebildeten magnetischen Wage die aufsteigende Rohkurve der B, H-Werte und hieraus mit Hilfe der in Fig. 252 angegebenen aufsteigenden Scherungslinie die Reinkurve abzuleiten. Nur erfolgt hier die Ablesung von B nicht direkt an einer in B geteilten Skala, sondern mit Hilfe der Ablesungen der Gewichtseinstellungen bei Abreißgleichgewicht in der in **140** angegebenen Weise.

Etwas umständlicher gestaltet sich die Gewinnung der Reinkurve für B, H mit dem in **142** beschriebenen und in Fig. 254 abgebildeten Wismut-

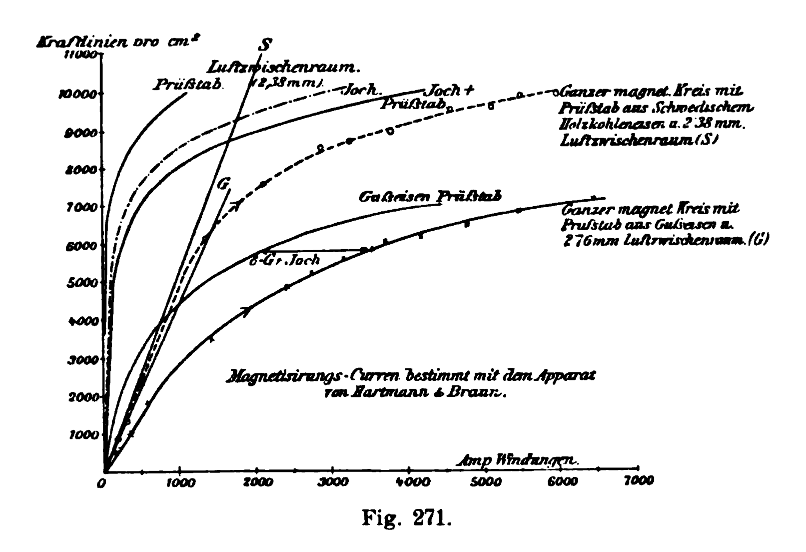


Fig. 271.

apparat. Hat man, wie in **151** angegeben, mit Hilfe der für die Wismutspirale beigegebenen Eichkurve die B_0-Werte für die aufsteigende Magnetisierungskurve des ganzen magnetischen Kreises ermittelt und zu diesen B_0-Werten gleichzeitig durch Ablesen der Erregerstromstärke $\overline{J}_l$ und Multiplikation von $\overline{J}_l$ mit der Summe aller Magnetisierungswindungen w_l die erforderlichen Amperewindungen als Abszissenwerte bestimmt, so möge die Eintragung beider Werte etwa die in Fig. 271 dargestellten Kurven liefern. Hierbei ist vorausgesetzt, daß zunächst die strichlierte Kurve als Normalkurve bei demselben Eisen für das unveränderliche Joch und den auswechselbaren Prüfstab, hier schwedisches Holzkohleneisen, unter genauer Ausmessung des Luftzwischenraumes, hier 2·38 mm, ermittelt wurde und hierauf etwa die ausgezogene Kurve, nachdem der Prüfstab aus schwedischem Normaleisen ersetzt wurde, durch einen zu untersuchenden Gußeisenstab von gleichem Durchmesser und nahezu gleicher Länge, hier um 0·38 mm kürzer, da der wiederum durch die angebrachte Mikrometerschraube ermittelte Luftzwischenraum diesmal 2·76 mm betrug.

Die Gewinnung der Reinkurve für das Gußeisen erfordert nun folgendes Vorgehen: Die Rückscherung der strichlierten Kurve um die Grade S liefert

die mit Joch + Prüfstab bezeichnete ausgezogene Kurve; die Lage von S wurde hierbei durch Berechnung eines Abszissenwertes, etwa des für $B = 10\,000$ zu $10\,000 \cdot 0{\cdot}238 \cdot 0{\cdot}8$ Amperewindungen festgelegt. Nach Abzug der für den Luftraum nötigen magnetischen Spannung (D'') können die verbleibenden Abszissenwerte (D') proportional der Weglänge der Kraftlinien in Joch und Prüfstab zerlegt werden, wodurch die bei allen Messungen als feststehende Ballastgröße wirkende Nettokurve für das Joch (strichpunktierte Kurve) gewonnen wird.

Um nun endlich aus der rohen Magnetisierungskurve für den ganzen magnetischen Kreis mit Gußeisen-Prüfstab die Reinkurve für den letzteren abzuleiten, hat man von jedem Abszissenwerte D der Rohkurve einen Betrag D'' abzuziehen, der aus der Summe von G, d. i. der magnetischen Spannung zur Überwindung des Luftzwischenraumes von 2·76 mm Länge und aus D_j'', d. i. der für das Joch erforderlichen magnetischen Spannung (strichpunktierte Kurve), gebildet wird. Obwohl ein verhältnismäßig günstiger Fall bei der Betrachtung zugrunde gelegt war, insofern ein Prüfstab mit sehr geringen Permeabilitätswerten (Gußeisen) angenommen wurde, so treten die Nachteile dieses Verfahrens mit Differenzmessung doch deutlich zutage. Es ist zwar sehr geeignet, um den Einfluß der Scherung aufzuzeigen und kennen zu lernen, wird aber den Meßtechniker hinsichtlich der Zuverlässigkeit des Endresultates nicht sonderlich befriedigen. Die mitgemessene Ballastgröße, gebildet aus den Abszissenwerten für die Luftstrecke und das Joch, ist nämlich gegenüber dem Endwerte sehr groß, so daß die prozentualen Fehler der direkt gemessenen Werte eine zu starke Vergrößerung erfahren, da sie, wie bei allen Messungen mit Ballastgrößen, mit ihrem vollen absoluten Betrage an dem gesuchten Restgliede haften bleiben.

Endlich ist als Fehlerquelle bei diesem Wismutapparat nicht zu übersehen, daß der Widerstand R der Wismutspirale nicht nur eine Funktion von B, sondern auch der Temperatur ist, und daß sich die letztere durch Wärmeleitung von der Erregerspule her leicht während der Messung merklich verändern kann. Um sich gegen diese Fehlerquelle nach Möglichkeit zu sichern, bleibt nichts übrig als von Zeit zu Zeit, wenigstens aber am Anfang und Ende jeder Meßreihe einer B, H-Kurve, den Wert von R_0 zu bestimmen, bei kleiner Änderung den Mittelwert zu nehmen und bei größerer möglichst den Gang von R_0 infolge der unvermeidlichen Temperaturänderung festzustellen. Aus dieser R_0-Kurve müßten dann zu jeder Messung von R_B die zugehörigen R_0-Werte nach Möglichkeit aufgesucht werden.

Der Übergang von der reinen Magnetisierungskurve des Prüfstabes zu seiner B, H-Kurve wird durch eine einfache Maßstabänderung der Abszissenwerte erhalten. Sind diese D'-Werte, wie z. B. in Fig. 271, zunächst in der technischen Einheit der Amperewindungen aufgetragen, so erhält man die H'-Werte, wenn man D' mit $\frac{1{\cdot}257}{l}$ multipliziert, wobei l die Länge des Prüfstabes in cm ist.

In ähnlicher Weise, wenn auch entsprechend vereinfacht, erfolgt das Vorgehen bei der neueren Schlußjoch-Ausführung des Wismutapparates, wie ihn Fig. 255 in **142** darstellt.

160. **Stabmethoden.** Für Meßanordnungen, welche die zu prüfenden Eisenstäbe ohne Eisenrückschluß verwenden, also mit ganz offenen magnetischen Kreisen arbeiten, kommen neben der in **149** erwähnten Induktionsmethode zur Ermittelung

der Kommutierungskurve namentlich die in **132** erwähnten Magnetometermethoden für aufsteigende Magnetisierungskurven in Frage. In beiden Fällen muß darauf gesehen werden, daß das Verhältnis $m = l : d$ des Prüfstabes möglichst groß, am besten > 200 gewählt wird, um den Betrag der rechnerisch mit Hilfe der Entmagnetisierungsfaktoren γ gewonnenen Scherungsgraden zur Überführung der Rohkurve in die Reinkurve hinreichend zuverlässig bestimmbar und nebenbei nicht groß gegenüber dem Reinbetrag zu machen.

Die Notwendigkeit der Einhaltung des ersten Punktes folgt aus den früher (I, 2 in **291**) gemachten Ausführungen über die Werte von γ bei Zylindern nach Rechnung und Experiment, des zweiten Punktes aus den Betrachtungen am Schluß des letzten Artikels und aus den Scherungsgrößen, wie sie sich nach Ewing bei Verkürzung von l ergeben (siehe hierzu Hdb. I, 2 Fig. 371 in **292**).

Alle diese rechnerischen Ermittelungen des Scherungsbetrages, wie sie bei geraden Eisenstäben mit hinreichender Größe des Verhältnisses m benutzt werden, sind natürlich nur anwendbar, wenn die Kraftlinien, welche ihren Rückschluß von einem Pol zum anderen durch die Luft nehmen, sich zu jeder durch den Stab gelegten Ebene symmetrisch verteilen ohne merkliche Bevorzugung gewisser Richtungen, etwa wegen dort vorhandener Eisenmassen, d. h. geringeren magnetischen Widerstandes.

161. Vergleichende Methoden.

Neben diesen mehr oder weniger absoluten Methoden zur Ermittelung von B, H-Kurven lassen sich natürlich auch rein vergleichende Methoden hierfür anwenden. Namentlich sind dies die Nullmethoden mit Magnetometer, wie sie als magnetische Brücken in **134** bis **136** beschrieben wurden, und die in **150** angeführte Nullmethode mit Schwingungsgalvanometer. In beiden Fällen ist vorausgesetzt, daß die reine B, H-Kurve des als Normale benutzten Eisens genau bekannt ist, so daß die Werte für die Prüfstabkurve unmittelbar auf sie bezogen werden können. Weiterhin wird bei den magnetischen Brückenmethoden noch vorausgesetzt, daß die Fugen- oder Übergangswiderstände sich ausreichend aufheben, oder, wie in **127** angegeben, ausscheiden lassen.

Das Verfahren zur Aufstellung der B, H-Kurven mit den magnetischen Brücken geht aus den Ausführungen in **134** bis **136** ohne weiteres hervor, wobei nur noch zu beachten bleibt, daß die Punkte, welche für eine genügende Anzahl von allmählich ansteigenden Werten der Erregerstromstärke $\bar{J}_l$ gefunden werden, die aufsteigende B, H-Kurve liefern.

Im Gegensatz hierzu liefert die Kompensationsmethode mit Galvanometer als Nullinstrument die Kommutierungskurve. Zur Aufstellung der B, H-Kurve des Prüfeisens wird man also die Ordinatenwerte, d. i. $B = \bar{N}_b : q$ unmittelbar aus den Abgleichwerten $N_b = N_a \cdot \frac{w_a}{w_b} \cdot \frac{R_b}{R_a}$ (vgl. in **150**) erhalten, während die zugehörigen Abszissenwerte sich aus $D_b = 1{\cdot}257 \cdot \bar{J}_b \cdot w_l$ je nach dem Charakter des Kreislaufes B ergeben; also zu $H = D_b : l_b$ bei ringförmigen Eisenproben (siehe hierzu in **157**), oder zu $H' = D_b' : l_b$ für solche mit Luftstrecken im magnetischen Kreislauf. Über die Ermittelung von D_b'', welches $D_b' = D_b - D_b''$ liefert, siehe die früheren Ausführungen (**127**, **156**).

B. Magnetische Verlustgröfsen.

162. Einteilung der Meß-methoden. Für alle ferromagnetischen Materialien ist die Erscheinung des wirkungsmäßigen (nicht zeitlichen) Zurückbleibens charakteristisch, die man als magnetische Hysterese bezeichnet. Diese Erscheinung hat, wie ausführlicher in Hdb. I, 2 Abschnitt V behandelt, neben einem Zwiespalt zwischen aufsteigenden und absteigenden Magnetisierungskurven und hieraus abzuleitenden Größen, wie z. B. μ, bei jedem Magnetisierungszyklus eine energetische Umsetzung aus elektrischer Energie in Wärme zur Folge. Vom technischen Standpunkt aus stellt dies einen Verlust dar und läßt die Messung seines Betrages, namentlich in Gestalt einer Charakterisierung der zur Konstruktion von Wechselstromapparaten erforderlichen Eisenbleche durch vergleichbare Verlustziffern, von großer praktischer Wichtigkeit erscheinen.

In seiner Eigenschaft als Metall zeigt das Eisen aber nebenbei eine Summierung der durch Wechselinduktion (schneidende Kraftlinien) verursachten elektromotorischen Differentialantriebe, deren strombildende Wirkung zwar durch geeignete Unterteilung stark herabgedrückt, aber nie ganz zu Null gemacht werden kann. Die hieraus für den Techniker sich ergebenden Verluste infolge von Wirbelstrombildung sind gleichfalls von seiten des Erregerstromes zu decken in Form einer Vergrößerung der primär zugeführten elektrischen Leistung (weiteres siehe Hdb. I, 2 in **306**).

Die Messung dieser beiden Verlustglieder ist bei Benutzung technischen Wechselstromes nur gemeinsam auszuführen, weil einmal die neue der Messung zugängliche Energieform (Wärme) in demselben Substrat (Eisen) auftritt, als auch die ursprüngliche elektrische Energieform, welche zu ihrer Deckung aufgewendet werden muß, gemeinschaftlich durch die Erregerleitung (Primärwickelung) zugeführt werden muß. Aus naheliegenden Gründen zieht man in der Technik nicht die umständliche und weniger genaue Messung der entwickelten Wärmemenge, sondern die Messung der zugeführten elektrischen Leistung vor. Über ein graphisches Verfahren der nachträglichen Trennung beider Verluste wird später (**175**) zu sprechen sein. Die Möglichkeit einer direkten experimentellen Trennung scheint auch noch dadurch gegeben, daß man die eine der beiden Verlustgrößen auf einem anderen Wege durch Messung getrennt ermittelt und dadurch die andere als Restglied erhält.

Für die Wirbelstromverluste ist, abgesehen von ihrer Berechnung auf Grund noch etwas unsicherer Annahmen (siehe Hdb. I, 2 in **306**), noch keine Meßmethode zur gesonderten Bestimmung bekannt. Hingegen gibt es für die Messung des Hystereseverlustes bei einem Magnetisierungszyklus eine ganze Anzahl Methoden (siehe den folgenden Abschnitt I), so daß die Ermittelung der Hystereseverluste bei technischem Wechselstrom durch Multiplikation des Verlustwertes jener Hystereseschleife in Erg auf 1 cm^3 Eisen mit der Zahl der Magnetisierungszyklen oder Perioden in einer Sekunde keine Schwierigkeiten zu bieten scheint. In Wirklichkeit braucht aber der so erhaltene Wert doch mit dem wirklich bei Wechselstrom auftretenden Wert nicht genügende Übereinstimmung zu zeigen, weil die Erfahrung lehrt, daß der gefundene Inhalt der Hystereseschleife von der Schnelligkeit der Stromänderung und somit auch von der sekundlichen

Periodenzahl abhängt (siehe I, 2 in **303**), ganz abgesehen davon, daß die Wirbelstrombildung wahrscheinlich auf den Hysteresebetrag zurückwirkt.

Auch ist in allen Fällen der Hysteresemessung darauf zu achten, daß diese Verlustgröße eine Funktion der Temperatur ist. Wenn auch die gewöhnlichen Temperaturschwankungen von einigen Celsiusgraden keine merkliche Veränderung bewirken, so doch eine erhebliche Erwärmung, wie sie bei größeren sekundlichen Periodenzahlen und bei längerem Betrieb aus den Verlustgrößen selbst als Sekundärerscheinung folgt.

Auf Grund der vorstehenden Überlegungen wurde für die Meßmethoden folgende Einteilung und Reihenfolge gewählt. Die verschiedenen in der Meßtechnik allgemeiner benutzten Meßanordnungen und in Anwendung gelangenden Verfahren zur Ermittelung der magnetischen Verlustgrößen wurden in 3 Hauptgruppen geteilt:

Die erste Gruppe umfaßt die Methoden zur punktweisen Ermittelung der Hystereseschleifen, welche auf Grund dieser Gewinnungsweise häufig als magnetostatische bezeichnet werden.

Die zweite Gruppe umfaßt die Methoden zur Messung und Vergleichung dynamischer Hysteresewerte, wobei neben der linearen Hysterese, welche durch die gebräuchlichen Meßverfahren fast allein zur Bestimmung gelangt und ganz überwiegend bei den Wechselstromapparaten in Frage kommt, die drehende Hysterese gleichfalls Berücksichtigung findet.

Die dritte Gruppe endlich umfaßt die zurzeit praktisch wichtigsten Meßanordnungen und Verfahren zur Ermittelung der Verlustgrößen mit technischem Wechselstrom, d. h. unter den Verhältnissen, wie sie in den Wechselstromapparaten während des Betriebes auftreten.

I. Punktweise Ermittelung von Hystereseschleifen.

163. Maßstäbliche Beziehungen und Gang des Verfahrens.

Die magnetische Rückstandserscheinung (Remanenz) bewirkt, daß die aufsteigende Magnetisierungskurve und die daran anschließende wieder absteigende eine Fläche zwischen sich läßt. Die Fläche liefert ein Maß für die Energiemenge, welche in Form von elektrischer Energie in der Erregerwickelung aufgewendet wurde zur Erzeugung des magnetischen Zwangszustandes im Felde, die aber trotz ihres Charakters als Spannungsenergie nicht völlig an andere Energieträger, hier im Besonderen die Erregerwickelung, zurückgeliefert wurde. Stellt man sich diese Differenz, welche im Felde zurückbleibt und dort in Wärme umgesetzt wird, als Verlust vor, der infolge von magnetischer Molekularreibung im Eisen auftritt (I, 2 in **285**), so liefert jener Schleifeninhalt zwischen auf- und absteigender Magnetisierungskurve für jeden Magnetisierungszyklus den Betrag des magnetischen Reibungsverlustes. Werden jene Magnetisierungskurven in den spezifischen Einheiten B (Kraftlinienzahl oder Wirkung auf 1 cm^2) und H (magnetisches Gefälle oder ursächliche Antriebskraft auf 1 cm) aufgetragen, so gibt also der Inhalt zwischen den B, H-Kurven in cm^2 gemessen den Verlust in 1 cm^3 Eisen in CGS-Einheiten (Erg $= 10^7$ Joule), wenn man das maßstäbliche Faktorenprodukt von $B \cdot H$ für 1 cm^2 — also z. B. für 1 cm Ordinate $=$ 1000 B-Einheiten und für 1 cm Abszisse $=$ 10 H-Einheiten das Produkt 10000 — noch mit dem Maßsystemfaktor $\frac{1}{4\pi}$ multipliziert, da die Polstärke von der Intensität $I = 1$ die Zahl von 4π Kraftlinien aussendet. Wird sonach die Hystereseschleife

einer Eisenprobe durch punktweises Ermitteln der beiden einschließenden B, H-Kurven konstruiert, so kann der Hystereseverlust für einen Magnetisierungszyklus innerhalb der untersuchten Grenzen von B und H durch einfaches Planimetrieren des Schleifeninhaltes bestimmt werden. Man erhält $\frac{c}{4\pi}\int H \cdot dB$ Erg, wenn $\int H \cdot dB$ in cm^2 gemessen wird und c die obenerwähnte maßstäbliche Konstante, etwa 10000, für 1 cm^2 angibt.

Die Messung des statischen Hysteresewertes stellt also nichts weiter dar als eine Anwendung der bereits in **132** bis **150** bzw. **157** bis **161** angegebenen Meßanordnungen, jedoch unter Einhaltung eines etwas anderen Vorgehens, um den Zusammenhang von B und H nicht wie in **147** in Form einer möglichst eindeutigen von Null ausgehenden B, H-Kurve zu erhalten, sondern eben als ein Paar zusammengehöriger B, H-Kurven beim Ab- und Aufsteigen. Zu diesem Zweck verfährt man bei allen Methoden im Abschnitt I derart, daß man zunächst durch Steigern der Erregerstromstärke $\bar{J}_I$ bzw. von H, also Verkleinern des Regulierwiderstandes V_I denjenigen Wert von B herbeiführt, für welchen als Maximalwert (B_{max}) die Untersuchung durchgeführt werden soll. Der zugehörige Wert von $(+\bar{J}_I)_{max}$, welcher das H_{max} liefert, wird genau beobachtet und notiert. Hierauf wird $\bar{J}_I$ bzw. H in passenden Stufen verkleinert und zu jedem dieser Werte von $+\bar{J}_I$ bzw. $+H$ der zugehörige Wert von B bestimmt, was abhängig von der benutzten Methode in der unten näher angegebenen Art erfolgt. Ist man so mit $+\bar{J}_I$ bzw. $+H$ nahezu auf den Wert Null angelangt unter Einschalten des verfügbaren Maximums von V_I, so wird durch Stromwenden das Vorzeichen von $\bar{J}_I$ bzw. H umgekehrt und durch stufenweises, bestimmtes Verkleinern von V_I, d. h. ohne Probieren oder Umkehren, das $-\bar{J}_I$ bzw. $-H$ wiederum in passenden Stufen vergrößert, bis $(-\bar{J}_I)_{max}$ genau dem $(+\bar{J}_I)_{max}$ bei Beginn gleicht. Die so erhaltenen Punkte aus zusammengehörigen H- und B-Werten liefern den einen Ast der Hystereseschleife, die genaue Umkehrung dieses Vorgehens bis zum abermaligen Erreichen von $(+\bar{J}_I)_{max}$ den anderen Ast. Die Differenz zwischen dem Ausgangswert $+B_{max}$ und dem Endwert $+B_{max}$, die eigentlich genau zusammenfallen sollten, aber stets etwas differieren, gibt einen Anhalt für die resultierende Fehlersumme der ganzen Versuchsreihe und damit auch für ihre Brauchbarkeit oder Verwerfung.

Erstreckt sich die Untersuchung auf sehr hohe Werte von H, so ist genauer nicht die gemessene spezifische Induktion B, sondern die nur vom Eisen herrührende Induktion $B_f = B - H \cdot 1$ einzusetzen (siehe I, 2 in **302**), doch wird der Unterschied in den meisten Fällen praktisch so gering sein, daß man ihn vernachlässigen kann.

Da die B, H-Kurven, wie sie unmittelbar durch die Messung gefunden werden, nur bei der Ringmethode als Reinkurven (ohne Scherung) erhalten werden, so fragt es sich noch, inwiefern die Scherung, wenn man sie vornimmt, auf den Inhalt der Hystereseschleife einwirkt.

Hier ist nun folgendes zu beachten: Wird die erforderliche Scherung, um den Reinwert der B, H-Kurven des Prüfstabes zu erhalten, nur durch Luftfugen bzw. -strecken bedingt, so wird sie durch dieselbe Scherungslinie bzw. -gerade dargestellt für den aufsteigenden und den absteigenden Ast der Hystereseschleife. In diesem Fall bleibt der Inhalt der Schleife im wesentlichen unverändert und der durch Planimetrierung ermittelte Wert der ungescherten und der gescherten Schleife fallen zusammen. Bei den-

jenigen Meßanordnungen und Methoden, welche außer dem Prüfstab noch zur Führung der Kraftlinien anderes, fremdes Eisen verwenden, wie die Jochmethoden und Luftschlitzmethoden, wird das fremde Eisen die Ursache sein, daß die Scherungslinien für den aufsteigenden und absteigenden Ast nicht völlig zusammenfallen (vgl. z. B. Fig. 247 und Fig. 252).

In diesen Fällen muß die Scherung mit Hilfe der beiden Scherungslinien vor dem Planimetrieren vorgenommen werden, da die aus Reinkurven bestehende Hystereseschleife auch einen anderen Inhalt besitzt als die aus Rohkurven bestehende.

Soll für einen Magnetisierungszyklus mit einem bestimmten B_{max} aus dem ermittelten Hysteresebetrag A, welcher innerhalb der praktisch am häufigsten benutzten Grenzen angenähert mit der Potenz von $B_{max}^{1\cdot6}$ wächst (siehe hierüber I, 2 in **302**), ein für das Material charakteristischer Hysteresekoeffizient h (sonst gewöhnlich mit η bezeichnet) abgeleitet werden, so ergibt sich dieser aus $A = h \cdot B_{max}^{1\cdot6}$ durch Rechnung zu

$$h = A : B_{max}^{1\cdot6}.$$

Nachdem so der allgemeine Gang angegeben ist, der allen Methoden dieses Abschnittes gemeinsam ist, sollen die einzelnen Methoden kurz besprochen werden. Hierbei wird nur die Ergänzung zu den früheren Ausführungen in **132** bis **161** anzugeben und auf bemerkenswerte Sonderheiten der einzelnen Methoden hinzuweisen sein.

164. Magnetometer. Drehspulenapparat. Magnetische Wage. Wismutapparat.

Das Verfahren zur Ermittelung der statischen Hystereseschleife mit Hilfe des Magnetometers ist durch die Ausführungen in **132** und die Angabe des Vorgehens bei der Stromstärkeänderung im Erregerkreis (siehe in **163**) völlig erläutert, da der Ausschlag des Magnetometers nach jeder stufenweisen Änderung von $\overline{J}_l$ bzw. H unmittelbar den Zustand der Magnetisierungsintensität $I = \frac{B_f}{4\pi}$ des Prüfstabes bzw. seiner Pole zur Messung bringt, der solange andauert als der neue Wert von $\overline{J}_l$ unverändert bleibt. Neben der Beobachtung des Ausschlages α am Magnetometer ist also die Aufmerksamkeit während der Messung auf die Unveränderlichkeit von $\overline{J}_l$, sowie auf seine Bestimmung zu richten. Allerdings wird selbst dann eine völlige Konstanz von α nicht zu erwarten sein, da das sogenannte „Kriechen" der Magnetometernadel (**132**), welches die unangenehmste Erscheinung bei den Magnetometerbeobachtungen darstellt, eine Unbestimmtheit von α bewirkt. Gegen dieselbe kann man kaum anders ankämpfen, als daß man die Ablesung von α stets in einem bestimmten Zeitpunkt nach dem Ändern von $\overline{J}_l$ vornimmt, ähnlich wie man dies bei Bestimmungen der Isolationswerte von Kabeln machen muß, die eine merkliche Nachladeerscheinung aufweisen. Im übrigen wird die Magnetometermethode zur Ermittelung von statischen Hystereseschleifen wegen der sonstigen Störungen (vgl. **131**) wohl nur noch ausnahmsweise Verwendung finden.

Die Aufnahme von Hystereseschleifen mit Hilfe des in **138** beschriebenen Drehspulenapparates, der namentlich für diesen Zweck und weniger zur Aufstellung von aufsteigenden B, H-Kurven gedacht ist, gestaltet sich außerordentlich bequem und einfach. Folgende Punkte sind aber hierbei besonders zu beachten: Während der Aufnahme einer ganzen Schleife muß die Hilfsstromstärke der Drehspule auf dem richtigen Wert (siehe in **138**) kon-

stant bleiben, oder mit Sorgfalt gehalten werden. Man wird sie daher unmittelbar vor Beginn einer jeden Schleife noch einmal mit Hilfe des Regulierwiderstandes genau einstellen und sie unmittelbar nach Schluß auf ihre Konstanz wieder nachzuprüfen haben.

Hierbei darf die Differenz gegen Beginn in Prozenten des ganzen Wertes nicht mehr betragen als man für das Endresultat als Zuverlässigkeit anstrebt. Durch Einsetzen des Mittelwertes bzw. seiner Abweichung vom vorgeschriebenen Normalwert kann man alsdann noch, falls nötig, eine Korrektion an allen B-Ablesungen vornehmen, um die wahren Werte zu erhalten. Beträgt jene Differenz mehrere Prozente, so ist dies ein Beweis, daß die für die Erzeugung des Hilfsstromes benutzte Stromquelle ungeeignet ist und vor der notwendigen Wiederholung der ganzen Meßreihe durch eine bessere ersetzt werden muß. Dies trat nach den Erfahrungen des Verfassers bei den ursprünglich beigegebenen Trockenelementen wiederholt ein, doch wurde der Übelstand nach Ersatz der Trockenelemente durch kleine Akkumulatoren behoben.

Für die vor der Planimetrierung erforderliche Scherung der ganzen Schleife mit gesonderten Scherungslinien für den aufsteigenden und den absteigenden Ast sind die jedem Apparat beigegebenen Scherungslinien (vgl. Fig. 247) zu benutzen, die durch Untersuchungen der Phys. Techn. Reichsanstalt gewonnen wurden, doch pflegt eine solche Scherung bei weicheren Eisensorten wegen ihrer geringen Änderung des Schleifeninhaltes nicht erforderlich zu sein.

Die magnetische Wage nach Du Bois (siehe in **140**) läßt sich gleichfalls zur Ermittelung von Hystereseschleifen benutzen, wenn man, bei den erforderten Maximalwerten von B_{max} bzw. H_{max} für den höchsten Punkt der Schleife beginnend, den Erregerstrom in der zuvor (**163**) angegebenen Weise variiert und zu jedem Wert von $\overline{J}_l$ bzw. H den zugehörigen B-Wert aus der Abreißkraft, wie in **140** angegeben, ermittelt, nur ist das Verfahren zur Gewinnung einer ganzen Schleife erheblich mühsamer und zeitraubender als beim vorbenannten Apparat mit direkter Ablesung der B-Werte. Auch hier muß die Scherung der erhaltenen Schleife zur Erlangung der Reinkurve und der wahren Hysteresefläche für den Prüfstab vor der Planimetrierung erfolgen, und zwar mit gesonderten Scherungslinien, wie Fig. 252 andeutet.

Die Gewinnung von Hystereseschleifen mit dem in **142** beschriebenen Wismuthspulen-Apparat läßt sich zwar auch in der Weise durchführen, daß man für den magnetischen Kreis mit Probestab bei B_{max} bzw. H_{max} beginnend die Erregerstromstärke $\overline{J}_l$ in der angegebenen Weise (**163**) variiert und zu jedem Wert von $\overline{J}_l$ bzw. H das zugehörige B durch verhältnismäßig rasch durchführbare Widerstandsmessungen (R_B) der Wismutspirale bestimmt. Um aber aus dieser Hystereseschleife für den ganzen magnetischen Kreis, bestehend aus unveränderlichem Joch, Luftraum und Probestab, die Schleife für den letzteren abzuleiten, muß man bei dem älteren Apparat (Fig. 254) zunächst den Inhalt der Hystereseschleife für das Joch allein ermitteln. Dies geschieht entsprechend dem bei Aufstellung der B, H-Kurve (Fig. 271) angegebenen Verfahren in der Weise, daß man den Totalwert des Hystereseverlustes für den ganzen Kreis bei demselben B_{max} für Joch und Prüfstab aus gleichem Eisen ermittelt, diesen Wert auf Joch und Prüfstab nach der Länge bzw. dem Volumen verteilt und den Betrag für das Joch jedesmal in Abzug bringt. Abgesehen von der Umständlichkeit ist dies Verfahren

mit demselben meßtechnischen Nachteil einer erheblichen Ballastgröße behaftet, wie früher (**159**) angegeben.

165. Induktionsmethoden. Verfahren bei einfacher Magnetisierungswickelung.

Die Induktionsmethoden mit Benutzung des Schwingungsgalvanometers, wie sie die Meßanordnung in **148** und das Verfahren zur Aufstellung der Kommutierungskurven in **157** zeigen, sind auch für die Ermittelung von statischen Hystereseschleifen im Laboratorium von besonderer Wichtigkeit. Allerdings kommen hier im wesentlichen nur die Anordnungen mit feststehenden Prüfspulen in Betracht, und auch diese wird man vielfach mit einer von Evershed und Vignoles (siehe **166**) angegebenen Änderung für die Felderregung benutzen.

Was zunächst die Anordnung des magnetischen Kreises anlangt, so wird man hier meistens die Ringmethode vorziehen, doch lassen sich auch die anderen Anordnungen mit Schlußjoch und mit ganz offenem Eisenkreis (Stabmethoden ohne Kraftlinienrückschluß durch fremdes Eisen), ähnlich wie bei der Aufstellung der B, H-Kurve angegeben, benutzen. Das Verfahren zur Aufnahme der Hystereseschleife zeigt in allen 3 Fällen keinen Unterschied, nur die Behandlung bei der Rückscherung der zunächst erhaltenen Rohkurven zur Erlangung der Hystereseschleife aus Reinkurven tritt, wo erforderlich, zu dem Auswertungsverfahren der Ringmethoden, welche unmittelbar die Reinkurven liefern, hinzu. Erforderlich ist diese Rückscherung nach dem oben (**163**) Gesagten aber höchstens bei Kreisen mit Fremdeisen (Schlußjoch), das merklich getrennte Scherungslinien für den auf- und absteigenden Ast verursacht.

Bei dem Verfahren zur Aufnahme der Punkte für die Hystereseschleife, die natürlich gleichfalls mit B_{max} und H_{max} bzw. $(\bar{J}_I)_{max}$, wie in **163** angegeben, beginnt, ist hier bei den Induktionsmethoden im Gegensatz zu allen vorhergehenden Methoden besonders zu beachten, daß nicht der jeweilige Zustand von B nach erfolgter Änderung von H bzw. $\bar{J}_I$ zur Messung gelangt, sondern daß dieser Zustand oder Punkt für B nur aus Differenzbeträgen abgeleitet werden kann. Ausgehend von B_{max} und H_{max} gelangen also die Differenzen ΔN oder ΔB zur Messung durch den Schwingungsgalvanometerausschlag, und zwar nur in Form eines rasch vorübergehenden Induktionsstoßes während der Änderung um ΔH bzw. $\Delta \bar{J}_I$.

Diese Gewinnung der Hystereseschleife in Form von treppenförmig gestuften Differenzwerten (vgl. Fig. 272), nämlich $\Delta B = \alpha \cdot C_B$ als Ordinate oder Stufenhöhe, gewonnen durch den Ausschlag α am Schwingungsgalvanometer mit der Kraftlinienkonstanten C_B (vgl. **144**) und bewirkt durch $\Delta H = C_I \cdot \Delta \bar{J}_I$ als Abszisse oder Stufenbreite, die sich aus der Ablesung von $\bar{J}_I$ vor und nach Änderung des Regulierwiderstandes V_I um ΔV_I und der Gefällkonstanten $C_I = \frac{1{\cdot}257 \cdot w_I}{l}$ (vgl. **128**) ergibt, besitzt bei Anwendung der in Fig. 262 angegebenen Meßanordnung mit einfacher Erregerspule folgende meßtechnische Nachteile:

Die Auflösung der Gesamtänderung von $+H_{max}$ bis $-H_{max}$ und wieder zurück, also von $4\,H_{max}$ bzw. $4\,(\bar{J}_I)_{max}$, ebenso wie der zugehörigen von $4\,B_{max}$ in viele kleine Sprünge mit entsprechend kleinen Ausschlagsdifferenzen beim Meßinstrument von $\bar{J}_I$ und kleinen Ausschlägen α am Schwingungsgalvanometer vergrößert die prozentualen Ablesefehler jeder Einzelablesung ganz erheblich. Wenn diese sich auch bei der Summierung zum Teil gegenseitig wieder herausheben werden, so ist doch die Wahrscheinlichkeit

einer erheblichen Differenz von Anfangs- und Endpunkt der Schleife nach Zurückkehren zu demselben Wert $+H_{max}$ und die Notwendigkeit der Verwerfung einer ganzen Meßreihe viel größer als bei durchschnittlich günstigeren Meßbedingungen hinsichtlich Beobachtungsfehler. Hierzu kommt noch, daß ein einmaliges Ausbrechen inmitten der Beobachtungsreihe, etwa durch Verpassen eines größten Ausschlages für einen Einzelwert ΔB, den Verlust der ganzen Meßreihe zur Folge hat, da die Wiederholung eines verpaßten oder auch zweifelhaften Differenzwertes bei der zwangläufigen Stufenfolge ausgeschlossen ist, und ein nochmaliger Beginn von $+H_{max}$ bzw. $+B_{max}$ notwendig wird.

166. Verfahren mit 2 Erregerwickelungen in Gegenschaltung.

Zur Beseitigung dieser Schattenseiten einer sonst wertvollen Laboratoriumsmethode haben Evershed und Vignoles (El. 27, 664 und 29, 583) folgende Änderung an den Erregerverhältnissen vorgenommen: Die Eisenprobe, am besten in Ringform, erhält 3 Wickelungen, deren jede über den

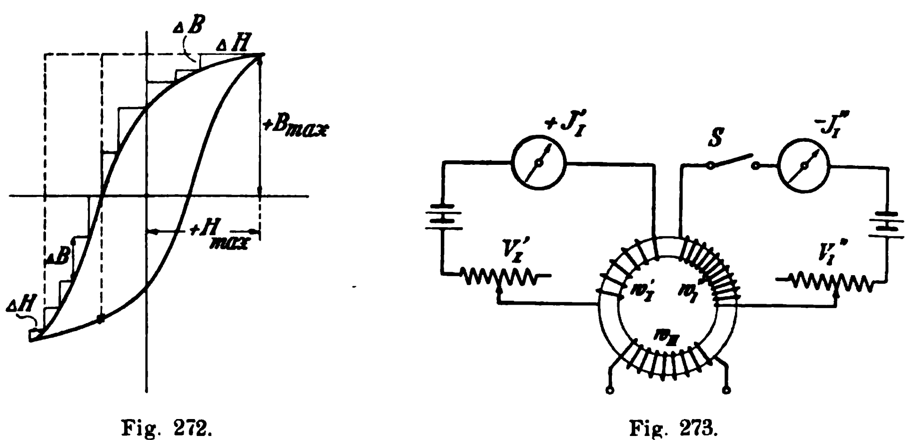


Fig. 272. Fig. 273.

ganzen Ringumfang verteilt ist, so daß die 3 Wickelungen über einander liegen (nicht, wie in Fig. 273 der besseren Deutlichkeit halber gezeichnet, nebeneinander). Von diesen wird die Sekundär- oder Prüfspulenwickelung (w_{II}) mit möglichst engem Anschluß an den Eisenumfang zunächst aufgebracht. Über diese kommen aber jetzt 2 völlig getrennte Erregerwickelungen, von denen die eine (w_I'') genau doppelt soviel Windungen erhält als die andere (w_I'). Jede der beiden wird an einen getrennten Erregerkreis mit gesondertem Amperemeter und Regulierwiderstand angeschlossen, wie Fig. 273 andeutet. Der Erregerkreis von w_I' wird so gewählt, daß die Stromquelle die erforderliche Stromstärke $+(J_I')_{max}$ zur Erzeugung von $+H_{max}$ bzw. $+B_{max}$, welches bei der Untersuchung in Frage kommt, längere Zeit ohne Erschöpfung liefern kann, und daß die Konstanz von $+(J_I')_{max}$, falls nötig, durch einen geeigneten feinstufigen, oder noch besser kontinuierlich veränderlichen Regulierwiderstand V_I' gesichert werden kann, und daß die Wickelung w_I' diesen Strom während der Untersuchungsdauer ohne erhebliche Erhitzung verträgt.

Der Erregerkreis w_I'' wird für dieselbe Stromstärke J_I'' wie w_I' bemessen, jedoch mit einem Stufenwiderstand V_I'' versehen, der die Regulierung von J_I'' in weiten Grenzen bis hinreichend nahe an Null gestattet, sowie außerdem mit einem Ausschalter S. Außerdem erfolgt die Wahl der Stromrichtung von J_I'' so, daß w_I'' im magnetischen Kreis eine *MMK* ausübt, die entgegengesetzt der von w_I' gerichtet ist, so daß sich beide für

$$-J_l'' = \frac{1}{2}(+J_l')$$

genau aufheben.

Das Verfahren zur Aufnahme der Hystereseschleife ist nun folgendes: Der Erregerkreis w_l' wird eingeschaltet und $+\bar{J}_l'$ so einreguliert, daß das gewünschte B_{max} erreicht ist, was durch Kommutieren von $\bar{J}_l$ bei eingeschaltetem Schwingungsgalvanometer nach dem in **148** und **157** angegebenen Verfahren zu prüfen bzw. zu messen ist. Dieses $+\bar{J}_l'$ bleibt nun während der ganzen Dauer der Messung unverändert eingeschaltet und wird konstant gehalten. Hierauf wird der mit w_{II} nach Fig. 262 verbundene Schwingungsgalvanometerkreis geschlossen und von den kleinsten Werten von $-\bar{J}_l''$ anfangend stufenförmig gegen $(-J_l'')_{max} = (+J_l')_{max}$ hinaufreguliert und jedesmal beim Schließen von S der Ausschlag $\alpha = \varDelta B \cdot \frac{1}{C_B}$ (vgl. **165** und Fig. 272) am Schwingungsgalvanometer beobachtet, sowie der zugehörige Wert von $-\bar{J}_l''$ bestimmt. Da letztere nach der Gleichung

$$(-J_l'' \cdot 2\,w_l' + J_l' \cdot w_l') = \pm\left(\frac{1{\cdot}257}{l} \cdot H\right)$$

die Abszissendifferenz zu jener Ordinatendifferenz liefert, so wird auch hier jeder Punkt der Hystereseschleife als Fußpunkt einer Stufe bestimmt, doch nehmen alle diese Stufen, wie in Fig. 272 für eine im absteigenden und eine im aufsteigenden Ast strichliert angedeutet, von $+H_{max}$ und $+B_{max}$ ihren Ausgangspunkt.

Dies gewährt außer sehr viel größeren mittleren Stufenwerten gegenüber dem Verfahren in **165** den großen Vorteil, daß jeder Wert beliebig oft kontrolliert bzw. wiederholt gemessen werden kann, da jedes Ausschalten von S das Zurückgehen des magnetischen Zustandes auf $+B_{max}$ und des Antriebes auf $+H_{max}$ zur Folge hat.

Die durch eine der vorstehenden Methoden von Abschnitt I erhaltenen zusammengehörigen Werte von B und H werden am besten in ein Koordinatensystem eingetragen, ein Ausgleich der Meßfehler durch graphische Interpolation (II, 1 in **5**) nach Möglichkeit herbeigeführt und ihre Auswertung, wie in **163** angegeben, vorgenommen.

II. Messung und Vergleichung dynamischer Hysteresewerte.

167. Allgemeines und Einteilung der Verfahren.

Alle im Abschnitt I angegebenen Methoden zur Aufnahme statischer Hystereseschleifen weisen nach den Untersuchungen der Phys. Techn. Reichsanstalt (siehe I, 2 in **303** Fig. 401) bei weichem Eisen merkliche Unterschiede in den erhaltenen Schleifen auf, je nachdem der Erregerstrom ganz stetig geändert wird, oder kleine, mittlere, oder große Sprünge ausführt, wie es die zuletzt erwähnten Induktionsmethoden notwendig machen. Diese Unsicherheit bei den statisch aufgenommenen Schleifen weist, ebenso wie die Erscheinung des „Kriechens“ (siehe **132**) während längerer Zeit nach Abschluß der Stromänderung, bereits darauf hin, daß die Zeitdauer, welche zur Aufnahme einer Hystereseschleife notwendig ist, nicht gleichgültig für das Meßergebnis ist. Da nun diese Zeitdauer zur Aufnahme einer genügenden Anzahl Punkte für eine ganze Hystereseschleife selbst unter günstigen Verhältnissen wohl 10 Minuten nicht unterschreiten kann, bei umständlicheren Methoden aber noch erheblich größer ausfallen dürfte, so entfernt sie sich

jedenfalls außerordentlich weit von den bei technischem Wechselstrom vorhandenen Verhältnissen, insoweit die Zeitdauer für einen Magnetisierungszyklus in Frage steht. Nach alledem ist es von Wert, auch die Möglichkeit der Messung dynamischer Hystereseschleifen oder -werte zu haben, bei denen einmal eine stetige Änderung des magnetischen Antriebes vorhanden ist und ein zweites Mal die Zeitdauer für das Durchlaufen eines Magnetisierungszyklus viel geringer ist als bei der Bestimmung statischer Schleifen, so daß wenigstens eine viel weitergehende Annäherung an die technische Periodendauer vorliegt, wenn auch in einigen Fällen kein völliges Erreichen der hierfür bei technischem Wechselstrom vorhandenen kurzen Zeitdauer.

Die hierbei in Frage kommenden Meßmethoden lassen eine Unterscheidung zu in Meßanordnungen zur Aufnahme dynamischer Hystereseschleifen und in Apparate zum Vergleich der Hysteresewerte von Eisenblechen beim Rotieren in dem Felde eines Dauermagneten.

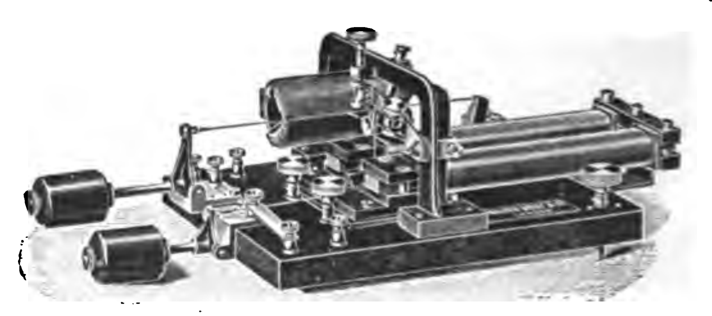


Fig. 274.

Die ersteren zerfallen wieder in Vorrichtungen zur unmittelbaren Aufzeichnung der Hystereseschleifen mit Hilfe von Lichtpunkt und beweglichem Spiegel, sei es zum Zweck des Photographierens der Schleifen, sei es zum Zweck des Projizierens für Demonstrationen, und in Vorrichtungen zur Aufnahme von Strom und Spannungskurven zum Zweck der nachträglichen Konstruktion der Hystereseschleifen aus diesen.

Bei der zweiten Gruppe wäre zu unterscheiden in Hystereseprüfer zur vergleichenden Messung der linearen oder gewöhnlichen Wechselstromhysterese und in solche zur Messung der drehenden Hysterese.

1. Die Gewinnung dynamischer Hystereseschleifen.

168. **Ewings Kurvenzeichner für Hystereseschleifen.**

Die unmittelbare stetige Aufzeichnung der Hystereseschleifen in einer Periodendauer, die die Größenordnung einer Sekunde besitzt, hat sich der Kurvenzeichner von Ewing zur Aufgabe gestellt. In seiner äußeren Ansicht zeigt ihn in der einen Ausführung Fig. 274, während Fig. 275 a, b und c die Hauptteile schematisch darstellt. Die Aufzeichnung der Hystereseschleife erfolgt mit Hilfe eines möglichst punktförmigen Strahlenbündels, das für Projektionszwecke am besten einer kleinen Bogenlampe entnommen und etwa mit Hilfe eines durchlochten Blechstückes aus der Zone größter Intensität ausgeschnitten wird, zum Photographieren aber wohl besser einer Glühlampe durch Ausschneiden mit Hilfe zweier senkrecht zueinander stehender Schlitze, etwa wie Fig. 276 andeutet. Dieses Lichtbündel fällt auf einen Konkavspiegel, der an einem Aluminiumbügel befestigt ist. Das eine Ende dieses

Bügels ist, wie Fig. 275 a andeutet, auf einer Spitze gelagert, so daß der Spiegel innerhalb gewisser Grenzen freie Beweglichkeit nach allen Seiten besitzt, das andere Ende ist an einem Fadenkreuz (siehe 1, 2, 3, 4 in Fig. 275 b) befestigt. das die Koordinatenbewegungen zum Aufzeichnen der Hystereseschleife veranlaßt.

Zu diesem Zwecke wird der Spiegel bzw. das Fadenkreuz für $H = 0$ und $B = 0$ im elastischen Gleichgewicht gehalten mit Hilfe der an Faden 1 und 2 angeschlossenen Spiralfedern, die gleichzeitig eine Einstellung des Lichtpunktes bzw. Spiegels auf den Nullpunkt des benutzten rechtwinkligen Koordinatensystems gestatten, wobei letzteres etwa für Projektionszwecke mit rückwärtiger Aufstellung des Kurvenzeichners durch eine Mattglastafel mit Kreuz aus schwarzen Kreidestrichen herstellbar ist. Die Abszissenbewegung — durch Faden 3 vermittelt — erfolgt ebenso wie die Ordinatenbewegung — durch Faden 4 vermittelt — auf Grund des elektro-

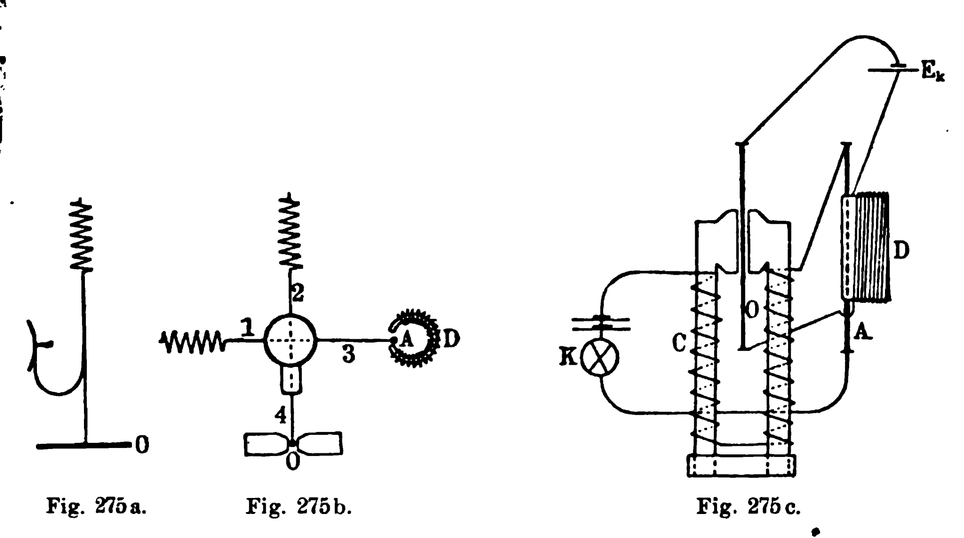


Fig. 275a. Fig. 275b. Fig. 275c.

dynamischen Bewegungsprinzips, wie es bereits in **137** bei Fig. 243 besprochen wurde, nur daß hier sowohl für den Abszissendraht A als für den Ordinatendraht O beide Bewegungsrichtungen von Null aus für die Messung durch direkten Ausschlag bei Spannung des Drahtes A bzw. O benutzbar sind, nicht nur die eine Richtung des Bewegungsantriebes, wie in dem in Fig. 243 angegebenen Apparat zur Messung des mechanischen Antriebes durch Kompensation.

Um nun die Koordinatenantriebe proportional mit H bzw. B zu erhalten, ist folgendermaßen verfahren: Der Abszissendraht A (vgl. Fig. 275 b und c) befindet sich in einem Felde, das durch eine während der Messung konstant gehaltene MMK erregt (mit Hilfe der Akk. E_k und der Wickelung D nebst einem nicht gezeichneten Regulierwiderstand) und deshalb innerhalb des Bewegungsbereiches von A angenähert homogen ist. Wird jetzt durch A selbst ein veränderlicher und zwischen $+J_{max}$ und $-J_{max}$ variierender Erregerstrom geschickt, so wird A eine mit $\tilde{J}_l$ und damit auch mit $\tilde{H}$ proportionale Abszissenbewegung ausführen und für sich (d. h. bei $B = 0$) den Lichtpunkt, welchen der Konkavspiegel erzeugt, um Null in der Abszissen-

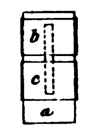


Fig. 276.

achse pendeln lassen, sowie bei hinreichend rascher Variation von $\tilde{J}_l$ in ein Lichtband ausziehen.

Diese Variation von $\tilde{J}_l$ wird bei Ewings Apparat mit Hilfe eines kontinuierlichen elektrolytischen Stromwenders (in Fig. 275 c durch K angedeutet) besorgt. An dessen 2 feststehenden, streifenfömigen Zinkplatten, welche in einem Zylinder mit Zinkvitriollösung einander gegenüberstehen, werden einige Akkumulatorzellen dauernd durch einen Regulierwiderstand angeschlossen, während die Enden der Drähte, die das eine Ende von A und das eine Ende der Erregerwickelung C (für die zwei stabförmigen Eisenblechbündel von dem zu prüfenden Material) mit K verbinden, an zwei Schleiffedern von K führen. Diese Schleiffedern stehen über Schleifringen mit 2 elliptisch geformten Zinkblechen in Verbindung, die auf einer rotierenden Holztrommel befestigt, mit den feststehenden Zinkplatten durch die elektrolytisch leitende Zinkvitriollösung in elektrischer Verbindung stehen, was beim gleichförmigen Rotieren der Holztrommel eine Variation der durch die Schleiffedern abgeleiteten Stromstärke nach Art eines periodischen Wechselstromes bewirkt. Dieser periodische Wechselstrom $\tilde{J}_l$ mit geringer sekundlicher Periodenzahl (etwa 1 bis 3) wird ein im gleichen Takt variierendes Wechselfeld $\tilde{N}$ im Prüfblech und dem bei O (vgl. Fig. 275 b) befindlichen Luftschlitz erzeugen.

In diesem Wechselfeld $\tilde{N}$, das in der Nähe des Ordinatendrahtes O' angenähert homogen sein, also in einem bestimmten Zeitpunkt eine räumlich gleichförmige Verteilung von B aufweisen soll, befindet sich der mit D in Reihe geschaltete (siehe Fig. 275 c), also von konstantem Strom $\bar{J}$ durchflossene Kupferdraht O. Dieser erhält nach der elektrodynamischen Gleichung in **137** einen mit $\tilde{B}$ proportionalen Antrieb, wodurch die Ordinatenbewegung des Spiegels proportional mit B erreicht ist. Da durch diese Anordnung die Antriebe zwangläufig im gleichen Takt erfolgen müssen, so zeichnet der Spiegel auch die Hystereseschleife richtig auf, so lange gewisse Grenzen nicht überschritten werden.

Diese Grenzen werden zunächst durch die Eigenschwingungen der gespannten Drähte bedingt, welche bei zu hohen Periodenzahlen (etwa oberhalb 20) hereinspielen und der Lichtkurve Zwischenschwingungen erteilen, die schließlich so überwiegen, daß die Hysteresekurve in den phantastischen Lichtschnörkeln untergeht. Ferner wird die Größe der Schwingungen von O und A, welche von der Wahl der beiden Stromstärken $\tilde{J}_l$ und $\bar{J}$ abhängen, zu beschränken sein, um durch mangelnde Homogenität der Felder $\tilde{N}$ bzw. N keine zu großen Abweichungen in der Proportionalität zwischen den Elongationen von A und O und den Größen $\tilde{H}$ bzw. $\tilde{B}$ zu erhalten.

Dieser Punkt in Verbindung mit der etwas umständlichen Bestimmbarkeit der absoluten Werte für die Lichtpunktausschläge steht einer Benutzung dieses sinnreichen Apparates für genauere Messungen am meisten im Wege, läßt ihn aber um so mehr für Demonstrationszwecke zur Aufzeigung gröberer Unterschiede geeignet erscheinen.

169. **Ableitung aus Spannungs- und Stromkurven.** Die unmittelbare Aufnahme der Hystereseschleifen bei technischen Periodenzahlen ist vorerst durch ähnliche Apparate (wie der vorstehend beschriebene Kurvenzeiger) noch nicht ausführbar, wenn auch die Möglichkeit der Ausführung eines Apparates mit hohen Eigenschwingungen ähnlich den früher (**52 ff.**) angeführten Oszillographen wohl nicht ausgeschlossen erscheint. Vorläufig ist man aber darauf angewiesen für solche Periodenzahlen die Hystereseschleife aus den zusammengehörigen Spannungs- und Stromkurven

rückwärts zu konstruieren, was abgesehen von der Mühsamkeit, das Endresultat auch immer etwas unsicher erscheinen läßt.

Das Vorgehen hierbei wäre, unter Hinweis auf die früheren Ausführungen über die Meßanordnungen zur Aufnahme von zusammengehörigen Strom- und Spannungskurven (siehe **53 ff.**) etwa kurz folgendes:

Ist das zu untersuchende Eisen, das am besten aus ringförmig aufgebauten Blechen besteht, mit einer Magnetisierungswickelung versehen, die mit Wechselstrom aus einer geeigneten Wechselstromdynamo gespeist wird, so wird unter Einschaltung einer Vorrichtung zur Aufnahme von Spannungs- und Stromkurven nach dem in **53** angegebenen Schema, am besten vielleicht eines Oszillographen, die Spannungskurve an den Enden der Magnetisierungswickelung und (in dasselbe Koordinatensystem zur gleichzeitigen Feststellung der Phasenverschiebung) die Kurve für die Stromstärke in der Wickelung aufgenommen. Die so erhaltenen Kurven, deren Wert natürlich auch in absolutem Maß festgestellt werden muß, unter Ermittelung des Voltmaßstabes für die Spannungskurve, des Amperemaßstabes für die Stromkurve (siehe hierzu Fig. 96), müssen nun zur Konstruktion der Hystereseschleife analytisch behandelt werden, und zwar unter genauer Umkehrung des in Hdb. I, 2 (**301** bei Fig. 391 und 392, sowie **306** bei Fig. 414 und 415) angegebenen synthetischen Verfahrens. Zu diesem Zweck müßte zu der Spannungskurve, falls nötig nach geometrischer Subtraktion der Spannungsabfallkurve $\tilde{J}_I \cdot R_I$, die Feldkurve für $\tilde{N}$ bzw. $\tilde{B}$ abgeleitet werden (siehe hierzu I, 2 in **303** bei Fig. 400). Ferner müßte die beobachtete Stromkurve zunächst in die zwei Komponenten des Magnetisierungsstromes $\tilde{J}_\mu = \tilde{J}_I \sin\varphi$ und $\tilde{J}_{h+w} = \tilde{J}_I \cos\varphi$ zerlegt werden, woraus die Hystereseschleife in der a. a. O. angegebenen Weise durch Konstruktion ableitbar ist. Diese Schleife entspricht jedoch nicht streng der reinen Hysterese, sondern enthält bei Benutzung der Komponente $\tilde{J}_{h+w}$ auch den Wirbelstromeinfluß. Die weitere Zerlegung von $\tilde{J}_{h+w}$ in $\tilde{J}_h$ und $\tilde{J}_w$ ist aber nur unsicher möglich, weshalb man besser für die Untersuchung möglichst dünne, gut voneinander isolierte Bleche verwendet, um den Einfluß der Wirbelströme so klein als möglich zu machen, so daß bei den technischen Periodenzahlen die weitere Zerlegung überhaupt nicht notwendig erscheint, oder doch keine erheblichen Fehler verursachen kann. Aber selbst dann behält die auf diesem Wege konstruierte Hystereseschleife etwas hypothetischen Charakter, so daß dieses Verfahren wohl nur selten technische Verwendung finden dürfte. Über Stromkurven bei eisengeschlossenen Apparaten siehe H. HINDEN (1903 S. E. V. Band IV Heft 11).

2. Vergleich der Hysteresewerte von Eisenblechen.

170. Ewings Hysteresezeiger.

Für viele Zwecke der Wechselstrompraxis, namentlich dort, wo man einen möglichst raschen Vergleich durch Werkstattmethoden anstrebt, werden keine sehr hohen Anforderungen an die prozentuale Zuverlässigkeit des absoluten Wertes gestellt, sondern es handelt sich mehr darum, Bleche rasch nachzuprüfen, um solche Sendungen bzw. Chargen ausschließen zu können, die zu hohe Hysteresekoeffizienten aufweisen. Für solche Messungen in Walzwerken oder Dynamobauwerkstätten ist daher ein Vergleich mit Normalblechen und die ungefähre Bestimmung des Hysteresekoeffizienten (h bzw. η siehe in **163**) vielfach ausreichend. Diesen Zweck wollen die als Zeigerinstrumente ausgebildeten Hystereseprüfer erfüllen.

Der erste derartige Apparat wurde von EWING ersonnen. Dieser in Fig. 277 abgebildete Apparat besteht aus einem O-förmig gebogenen Dauermagneten, welcher auf Schneiden gelagert und mit einem über einer Skala spielenden Aluminiumzeiger verbunden ist. Zwischen die beiden Pole dieses Dauermagneten werden die mit Hilfe einer Lehre in Länge und Breite genau abgeglichenen Probebleche in eine Schwungvorrichtung aus unmagnetischen Materialien eingeklemmt, welche mittels Reibungsradübersetzung zentrisch drehbar angeordnet ist und in der Sekunde etwa zwischen 4 und 12 Dre-

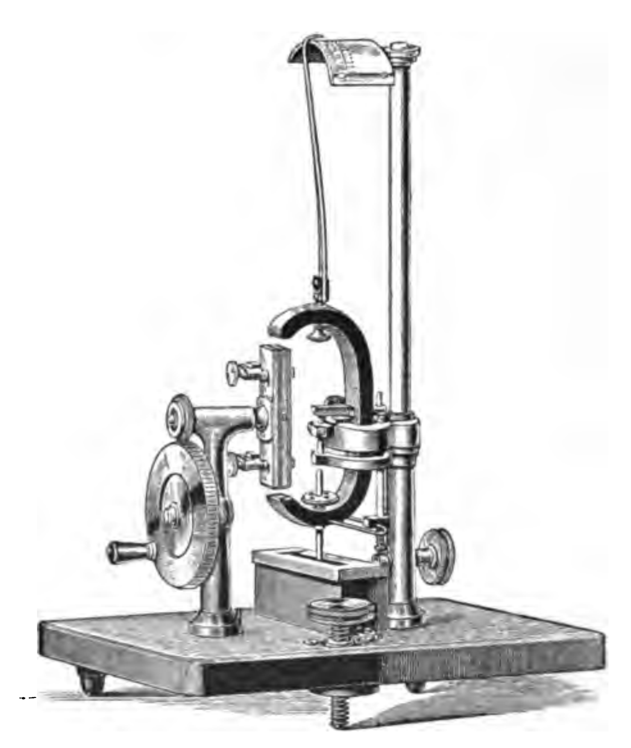


Fig. 277.

hungen ausführen kann, die ebensoviel Magnetisierungszyklen der Probebleche entsprechen.

Jene Bleche, die angenähert denselben Nettoquerschnitt erhalten, indem man die Nettodicke etwa gleich 6 Blechen von 0·5 mm wählt, bilden nämlich bei senkrechter Lage den magnetischen Schluß für den Dauermagneten und müssen daher bei jeder Drehung eine Ummagnetisierung erfahren, die dem Dauermagneten einen mit der Koerzitivkraft H_C proportionalen Antrieb erteilt. Wegen der sehr angenäherten Proportionalität von H_C mit dem Inhalt der Hystereseschleife kann der Ausschlag auch direkt als Maß für die Hysteresearbeit A dienen. Daß der Antrieb tatsächlich mit H_C proportional und angenähert unabhängig von der Umdrehungszahl sein muß, zeigt folgende Überlegung: Der magnetische Antrieb in Längsrichtung der Blechstreifen wird bei erreichter Horizontallage zu Null. Für $H_C = 0$ oder hysteresefreies Blech würde auch in dieser Lage jede Magnetisierung im Blech, bzw. jede Polarität desselben verschwunden sein und der Dauermagnet keinen einseitigen Antrieb erhalten, d. h. Ausschlag zeigen, da

die als Drehmoment auftretende Anziehung zwischen Dauermagnet und Blech zur Erhaltung eines Minimums von magnetischem Widerstand in beiden Drehrichtungen gleich stark auftritt und daher keinen Ausschlag hervorrufen kann.

Die infolge der Endlichkeit von H_C verbleibende Remanenz N_R bzw. Polarität des Blechbündels über die horizontale Neutrallage 00 hinaus (Fig. 278) hat in dem zweiten Quadranten einen Kontrast der beiden Felder N_R des Blechbündels und $\bar{N}_D$ des Dauermagneten zur Folge. Während der Weiterdrehung nimmt N_R unter dem wachsenden Einfluß des gegensätzlichen Dauermagnetfeldes stetig gegen Null ab, ebenso die aus dem Kontrast folgende Kraft zwischen den beiden Feldträgern. Der Kontrast hat eine Ablenkung des Dauermagneten im Drehsinne des Blechbündels zur Folge, da das bewegliche $\bar{N}_D$ auf dem kürzesten Wege mit dem zweiten kontrastierenden Felde zur Deckung in der Kraftlinienrichtung zu kommen sucht, oder, in der Ausdrucksweise der Polvorstellung, die gleichnamigen Pole sich abstoßen.

Da die Antriebsgröße $\int_0^\tau f \cdot dt$ von dem mit der Größe von H_C proportional wachsenden f einerseits, von der Zeitdauer τ andererseits abhängt, die bis zur völligen Aufhebung von H_C durch die vom Dauermagneten ausgehende Gegenkraft H_D verfließt, so folgt hieraus die Unabhängigkeit von der Drehgeschwindigkeit, wenn man vom mechanischen Luftzug absieht. Das Gleichgewicht zwischen $-H_C$ und $+H_D$ tritt nämlich für ein bestimmtes Eisen stets an demselben Punkt des Raumes ein, so daß der mit der Periodenzahl wachsenden Zahl der Antriebe f eine ebensolche Verkürzung der Einzelantriebe, d. h. Verkleinerung von τ gegenübersteht. Die Ablenkung des Zeigers in Graden der Skalenteilung gibt also ein Maß für die Hysteresearbeit A, bzw. für den Koeffizienten h des Materiales.

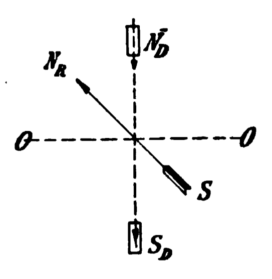


Fig. 278.

Für rohere Messungen kann man direkte Proportionalität annehmen; einen genaueren Wert erhält man jedoch bei folgendem Verfahren: Die Ablenkungen α' und α'', welche die beiden beigegebenen Normalblechproben, ein besonders gutes und ein besonders schlechtes, mit bekannter Hysterese A' und A'' liefern, werden in Koordinatenpapier — Ablenkungen α' und α'' als Abszissen, Hysteresewerte A' und A'' bzw. h' und h'' als Ordinaten — eingetragen, jene beiden Punkte für die Normalbleche durch eine Gerade verbunden und letztere verlängert. Derjenige Punkt der Geraden, welcher der abgelesenen Ablenkung α_x des Prüfbleches entspricht, liefert als zugehörige Ordinate den gesuchten Hysteresewert A_x.

Die Empfindlichkeit kann bei jener Eichung mittels der Normalbleche durch Herauf- oder Herabschrauben des unten angebrachten Übergewichtes, das bei der Drehung gehoben wird und die Gleichgewichtseinstellung für den Antrieb $\int_0^\tau f\,dt$ bewirkt, beliebig einreguliert werden. Dieses Einregulieren soll so erfolgen, daß das schlechteste Prüfblech bzw. Normalblech, also das mit dem höchsten Werte von A bzw. h, einen Ausschlag nahe dem Skalenende liefert. Die Drehgeschwindigkeit wird so gewählt, daß der Ausschlag des unten mit Öldämpfung versehenen Schwingungssystems stetig wird. Die Ablenkung durch die Vertikalintensität des Erdfeldes macht man dadurch

unschädlich, daß man das Instrument so einstellt, daß die Ebene möglichst in den magnetischen Meridian fällt. Die noch verbleibende kleine Einseitigkeit im Ausschlag kann man unschädlich machen, indem man stets die Ausschläge nach rechts und nach links beobachtet und ihre Summe als Vergleichswert benutzt.

Der Dauermagnet und der normale Blechquerschnitt sind so gewählt, daß B_{max} im letzteren etwa den Wert 4000 Kraftlinien auf 1 cm² besitzt. Will man den Hysteresewert A in Erg, wie er aus dem für die Normalbleche angegebenen absoluten Werte durch Vergleich folgt, auf andere Werte von B_{max} umrechnen, so soll man sie nach Ewing mit der Verhältniszahl g multiplizieren, deren Werte kleine Abweichungen zeigen gegenüber den Werten, wie sie aus der Steinmetzformel (**163**) folgen.

B in Kilolinien =	2	2·5	3	4	5	6	7	8
g =	0·33	0·47	0·63	1·00	1.41	1·89	2·41	3·00

Für die richtige Beurteilung der für Abschnitte von einer Blechtafel gefundenen Ergebnisse bleibt — auch bei Einhaltung des richtigen Querschnittes der Blechprobe und bei gegenseitiger Isolierung der einzelnen Blechstreifen, etwa durch Zwischenlagen von dünnem Seidenpapier, zur Vermeidung des Auftretens merklicher Wirbelstrombildung und deren Rückwirkung auf den Hysteresewert — noch folgendes zu beachten: Die Wahl der Blechausschnitte aus der Blechtafel ist durchaus nicht gleichgiltig für den Hysteresewert, da die Unterschiede innerhalb derselben Tafel ganz erheblich sein können. Wenn sie wohl auch nicht immer den von Stern (vgl. ETZ 1901, 432) nachgewiesenen Betrag von 28 % erreichen, so sind doch stets Unterschiede von mehreren Prozenten zu erwarten, je nachdem die Blechprobe vom regelmäßig etwas schlechteren Rande, oder aus der Mitte entnommen wurde; noch größer soll der Unterschied sein zwischen den Streifen, welche in Walzrichtung geschnitten sind, und solchen, welche senkrecht zu ihr geschnitten sind, wobei letztere bis zu 10 % höhere Verluste aufweisen.

Ein Apparat nach Blondel (ETZ 1899, 178) bei welchem die Eisenstreifen bei Fig. 277 durch runde Eisenscheiben ersetzt werden und der Dauermagnet rotiert, mißt die Werte der drehenden Hysterese anstelle der linearen.

III. Verlustgrößen bei technischem Wechselstrom.

171. **Meßanordnung der Wattmetermethode.**

Bei den im Abschnitt II angeführten Methoden stehen die Meßverhältnisse den Betriebsverhältnissen der Wechselstromtechnik bereits erheblich näher, als bei den Methoden im Abschnitt I. Immerhin besteht aber in der sekundlichen Periodenzahl doch noch ein erheblicher Abstand. Die Untersuchungen über den Einfluß der Periodenzahl auf den Inhalt der Hystereseschleife (siehe I, 1 in **303**), namentlich aber auch ihr starker Einfluß auf die Ausbildung von Wirbelströmen, welche teils die Hystereseerscheinung und die Deutung der Meßwerte komplizieren, teils die Verlustgrößen im Eisenblech erhöhen, lassen nun für viele Zwecke der Technik eine noch viel weitergehende Annäherung der Meßverhältnisse an die Betriebsverhältnisse notwendig erscheinen.

Die einzige Methode, welche hierbei für allgemeinere technische Messungen in Frage kam, war die Ermittelung der im Eisen bei Beschickung mit technischem Wechselstrom auftretenden Verluste aus der Messung der hierfür

von außen zugeführten elektrischen Leistung. Die Trennung dieser Gesamtverluste in Hysterese- und Wirbelstromverluste mit Hilfe der Variation der Periodenzahl bildet alsdann erst eine sekundäre Aufgabe, deren Lösung auch bisher noch nicht so vollkommen gelungen ist, wie diejenige der Hauptaufgabe.

Die Grundlage aller Meßanordnungen bildet die Benutzung eines aus den zu untersuchenden Eisenblechen aufgebauten Eisenkörpers, meist nach Art eines eisengeschlossenen Transformatorgestelles, Umgeben dieses Gestelles mit einer nach Drosselspulenart ausgeführten Wechselstromwickelung und Messen der von dieser Wickelung aufgenommenen elektrischen Leistung nach einer der früher (**63 ff.**) angegebenen Methoden unter gleichzeitiger Messung der Spannung $\tilde{E}$ an den Enden der Wickelung und der Stromstärke $\tilde{J}$ in der Leitung, teils zur Ermittelung des Wertes $\tilde{B}$, teils zur Anbringung der erforderlichen Korrektionen. Um einerseits den Zufälligkeiten der Hysteresewerte bei den einzelnen Blechstreifen mit ihren Unterschieden nach ihrer Lage zur Walzrichtung und zum Rande der Blechtafel (vgl. **170**) zu entgehen, und andererseits den absoluten Betrag der verlorenen Leistung in Watt so weit zu erhöhen, daß eine Messung mit den technisch verwendeten Wattmetern mit hinreichender prozentualer Zuverlässigkeit möglich wird, werden stets Eisenproben von mehreren Kilogramm Gewicht untersucht.

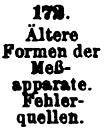
Das Schema für die übliche Meßschaltung wird also entsprechend der früher (**63**) bei den Leistungsmessungen mit Wattmeter angegebenen Meßanordnungen durch Fig. 279 angegeben, wobei hinsichtlich der Korrektionen zur Ermittelung der im Eisenkörper selbst umgesetzten Leistung und der Spannung auf die früheren Ausführungen verwiesen sei.

Dieselbe Meßanordnung gestattet eine Auswertung der Beobachtungen von $\tilde{W}$, $\tilde{E}$ und $\tilde{J}$ nicht nur in Richtung der Verlustgrößen, sondern auch der Wechselstrompermeabilität $\tilde{\mu}$ des Eisenblechs, vorausgesetzt, daß man sich mit dem Effektivwert für $\tilde{\mu}$ begnügt (siehe hierzu I, 2 in **301**); anderenfalls muß für den Momentanwert aus Maximum von Spannungs- und Stromkurve die Aufnahme der letzteren erfolgen (siehe **53 ff.**, sowie **169**). Für die $\tilde{\mu}$-Kurve der Hystereseschleife müßten weiterhin die Reinkurven für deren auf- und absteigenden Ast zugrunde gelegt werden (siehe hierzu **127**, **138**, **140**, **159**).

Einen erheblichen Einfluß auf die Zuverlässigkeit der Hysteresewerte, welche aus den richtig beobachteten bzw. korrigierten Werten von $\tilde{W}$, $\tilde{E}$ und $\tilde{J}$ nebst sekundlicher Periodenzahl und aus den Dimensionen des Eisenkörpers nach der Formel für die reinen Eisenverluste in 1 cm³

$$\tilde{W}_1 = h \cdot u \cdot B_{max}^{1\cdot6} + \beta \cdot u^2 \cdot B_{max}^2$$

abgeleitet werden, besitzt die Ausgestaltung des Blechgestelles und die Anbringung der Wickelung. Um diese Konstantenfehler der Meßanordnung, welche, ähnlich wie die Konstantenfehler von Instrumenten (vgl. II, 1 in **2 ff.**), durch keine noch so sorgfältige Beobachtung beseitigt werden können, möglichst klein zu machen, sind folgende Ausführungen in Vorschlag gebracht worden:



Die älteren Vorschläge bezogen sich auf Jochanordnungen mit bleibendem Hilfsjoch H (vgl. Fig. 280) und auswechselbarem Schlußstück S; man versuchte also einen dauernden Meßapparat zu schaffen, bei welchem nur das aus rechteckigen Blechstreifen leicht aufzubauende Schlußstück S aus dem

Prüfeisen gebildet wurde. Die Ermittelung der Verlustgrößen in letzterem erfolgte sonach durch ein ähnliches Differenzverfahren, wie in **142** angegeben, indem man zunächst die verlorenen Watt in dem ganzen Gestell bestimmte, wenn S aus demselben Blech wie H gebildet war, die gefundenen Verluste im Verhältnis von H und S teilte und dadurch die für H stationären Beträge erhielt, welche von dem gefundenen Gesamtwert mit anderen Eisenproben für S abzuziehen waren, um den Wert für S zu erhalten.

Zuerst wurde eine solche Meßanordnung mit zweiteiligem bewickelten Joch von DOBROWOLSKY und SCHMOLLER (siehe ETZ 1892, 406) angegeben, bei welcher das Prüfstück ohne Bewickelung als gemeinschaftliches Schlußstück zwischen die gegeneinander geschalteten Jochhälften eingeklemmt wurde. Diese Anordnung bot aber zu wenig Gewähr, daß der aus $\tilde{E}$ ermittelte Wert von B_{max} im Prüfstück vorlag, da die B-Werte im Joch wegen

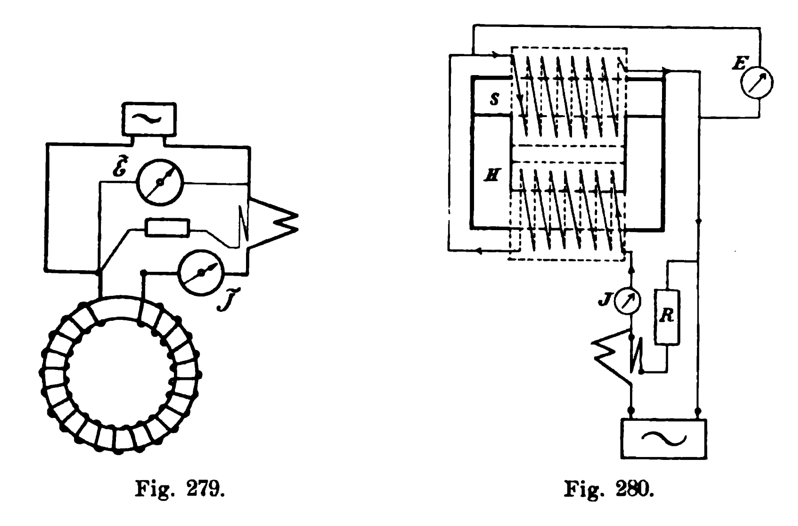


Fig. 279. Fig. 280.

der zu erwartenden starken Streuung jedenfalls größer sind als im Prüfstück.

Aus diesem Grunde wurde von KAPP (1895 siehe „Transformatoren" Seite 146) eine nach dieser Richtung einwandfreiere Anordnung angegeben, wie sie aus dem Schema der Fig. 280 hervorgeht. Hier wird die Spannung $\tilde{E}$ direkt an den Enden der Wickelung um S gemessen, was eine zuverlässigere Berechnung von B gestattet.

Wenn auch diese Anordnungen für ungefähre Vergleichszwecke ganz gute Dienste leisten mögen, so leiden sie doch bei Ermittelung absoluter Zahlenwerte für die Verlustgrößen im Eisen an zwei erheblichen Mängeln: Einmal wirkt die Differenzmessung mit der verhältnismäßig großen Ballastgröße H sehr ungünstig auf die Endwerte für S ein (vgl. hierzu in **142** u. **86**). Ein zweites Mal erscheint die Verwendung fremden Eisens neben dem Prüfblech in demselben Gestell nicht einwandfrei (vgl. **163**).

178. Festsetzungen über die Verlustziffer.

Als die Frage einer zuverlässigen Bestimmung der Eisenverluste bei Wechselstrom auf Grund der kräftigen Entwickelung der Wechselstromtechnik immer brennender und eine einheitliche Regelung dieser Bestimmung durch Normalien immer notwendiger wurde im Interesse der elektrotechnischen Fabriken mit ihrem außerordentlich anwachsenden Bedarf an Wechselstromblechen und zur Nachprüfung der von den Walzwerken verlangten Garantien, nahm der Verband Deutscher Elektrotechniker diese Angelegenheit

auf Anregung von EPSTEIN in die Hand und setzte die sogenannte Hysteresekommission zur Durcharbeitung dieser Frage ein. Nachdem diese als Meßmethode zunächst die Wattmetermethode ausgewählt hatte, als für technische Zwecke allein in Betracht kommend, galt es geeignete und praktisch möglichst bequeme Anordnungen zu finden, die als normale Eisenprüfapparate zugelassen werden konnten.

Als Norm sollte hierbei dienen, daß nur das zu prüfende Eisenblech mit einem Mindestgewicht von 10 kg (ohne fremdes Eisen) im magnetischen Kreis der Messung unterworfen werden sollte. Da weiterhin zahlreiche Vorversuche ergeben hatten, daß bei Messung desselben Blechpacketes in verschiedenen Meßlaboratorien zwar die gefundenen Gesamtverluste für ein bestimmtes $\tilde{B}_{max}$ und eine bestimmte Periodenzahl ziemlich gut übereinstimmten, hingegen die durch Trennung in Hysterese- und Wirbelstromverluste

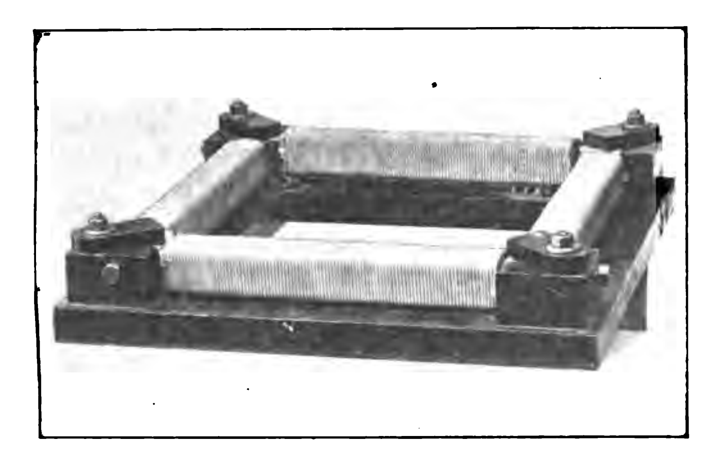


Fig. 281.

ermittelten Koeffizienten h und β (vgl. I, 2 in **306**) stark voneinander abwichen, so wurde festgesetzt, daß zunächst von einer solchen Trennung abzusehen sei und als Charakteristikum für ein Wechselstromblech nur die sogenannte Verlustziffer zu dienen habe. Unter „Verlustziffer“ ist hierbei die wattmetrisch gemessene Leistung in Watt zu verstehen, welche in 1 kg Eisen von 30° C Temperatur bei $\tilde{B}_{max} = 10\,000$ und 50 sekundlichen Perioden umgesetzt wird, ohne Rücksicht darauf, wieviel hiervon auf Hysterese, wieviel auf Wirbelströme entfällt. Als mittleres spezifisches Gewicht für die Berechnung aus den Nettodimensionen wurde endgiltig 7·77 festgesetzt.

174. **Eisenprüfapparate nach Epstein, Möllinger, Richter.**

Bisher sind 3 Eisenprüfapparate vorgeschlagen worden, die als Normalapparate im Sinne der Hysteresenormalien des V.D.E. anerkannt worden sind und deren Konstruktion im folgenden kurz angeführt sei:

Die älteste Ausführung ist der EPSTEINsche Apparat, der schon seit einer Reihe von Jahren im Laboratorium der Firma LAHMEYER zur Prüfung von Wechselstromblechen benutzt worden war. Wie Fig. 281 erkennen läßt, besteht er aus vier quadratisch angeordneten Blechpacketen, welche mit einer fortlaufenden Wickelung versehen sind und durch vier Holzbacken mit rechtwinkligen Ausschnitten und aufgeschraubten Deckbrettern zusammengehalten bzw. zur Herstellung eines möglichst kleinen magnetischen Fugenwiderstandes zusammengetrieben werden können. Jede Magnetisierungsspule

besitzt 150 Windungen auf 40 cm Länge, während die Blechstreifen eine Länge von 50 cm, eine Breite von 3 cm besitzen und in allen 4 Packeten zusammen 10 kg wiegen. Um die Wirbelströme nach Möglichkeit zu verringern, sollen alle Blechstreifen möglichst von Grat befreit, einzeln in Seidenpapier gepackt und durch Umwickeln mit Isolierband zu jenen Packeten vereinigt werden; diese selbst werden an den Stoßstellen durch zwischengelegte dünne Preßspanscheiben an der gegenseitigen metallischen Berührung verhindert.

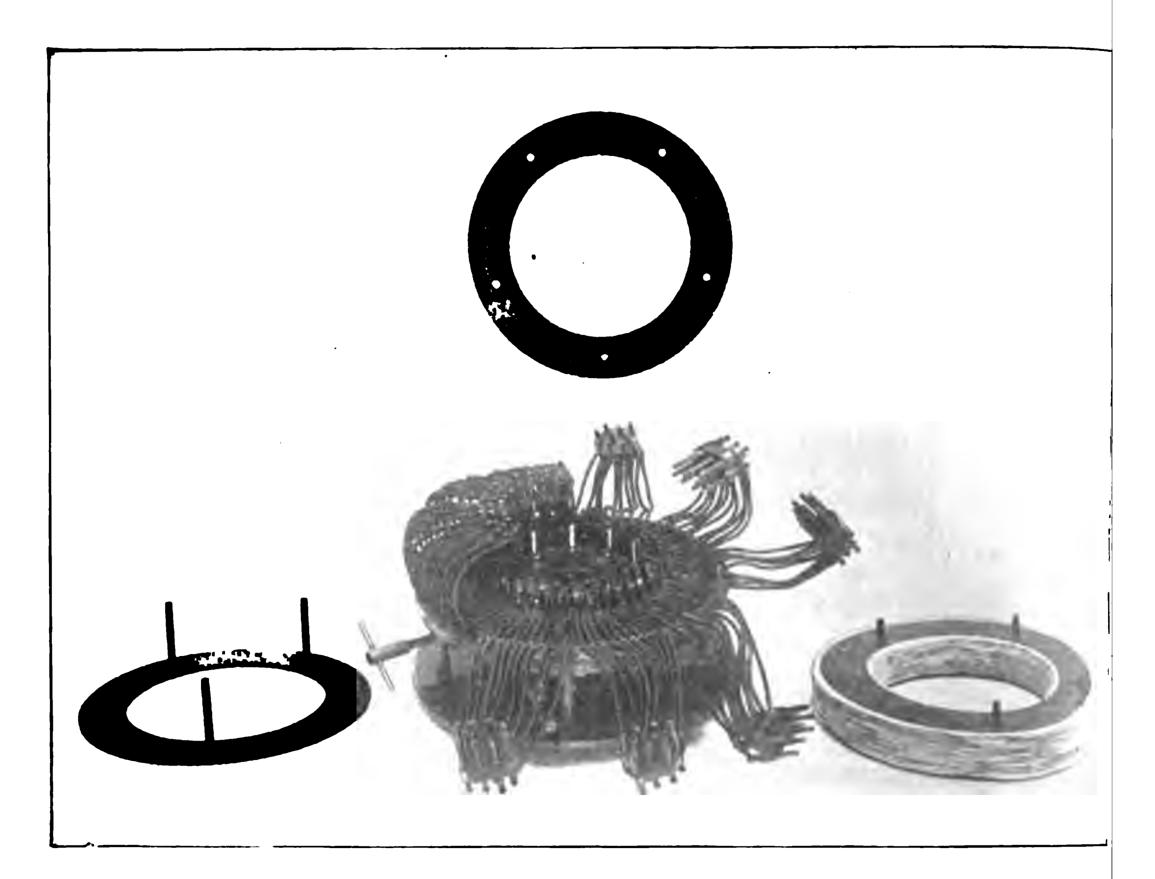


Fig. 282.

Um die Stoßfugen und die dadurch außer der Streuung bedingte große Phasenverschiebung ($\cos \varphi$ zwischen 0·2 bis 0·3), sowie die aus den hohen Leerstromstärken folgenden erheblichen Korrektionen zu vermeiden, wurde hierauf von Möllinger (siehe ETZ 1901, 379) ein Eisenprüfapparat in Ringform angegeben, dessen Hauptteile Fig. 282 erkennen läßt. Das Prüfblech wird in Ringform mit etwas variationsfähigem Durchmesser (etwa $d_a = 32$ bis 34 cm und $d_i = 22$ bis 24 cm) bei etwa 4·5 bis 5 cm Breite ausgestanzt und ähnlich wie bei Flachringen voneinander durch Papierstreifen isoliert zu einem Packet von etwa 10 kg Nettogewicht aufgebaut, das entweder durch Isolierband zusammengehalten wird, oder auch, wie Fig. 282 zeigt, mittels dreier Führungsstifte. Dieser Ring wird für die Messung in eine mittels lösbarer Kontakte geöffnete Wickelung von 100 Windungen aus

starkem Kupferkabel eingelegt und diese wiederum geschlossen durch Einsetzen der zu je 10 mittels einer Fiberplatte zusammengefaßten Kontakte (vgl. Fig. 282).

Der Wunsch, die vom Walzwerk kommenden Feinbleche unmittelbar in ihren gegebenen Dimensionen prüfen zu können unter Umgehung des in manchen Fällen doch schwer oder umständlich auszuführenden Stanzverfahrens und unter gleichzeitiger Erhaltung der Blechtafeln zu weiterer beliebiger Verwendung, ließ den von Richter (siehe ETZ 1902, 491 und 1903, 341) an-

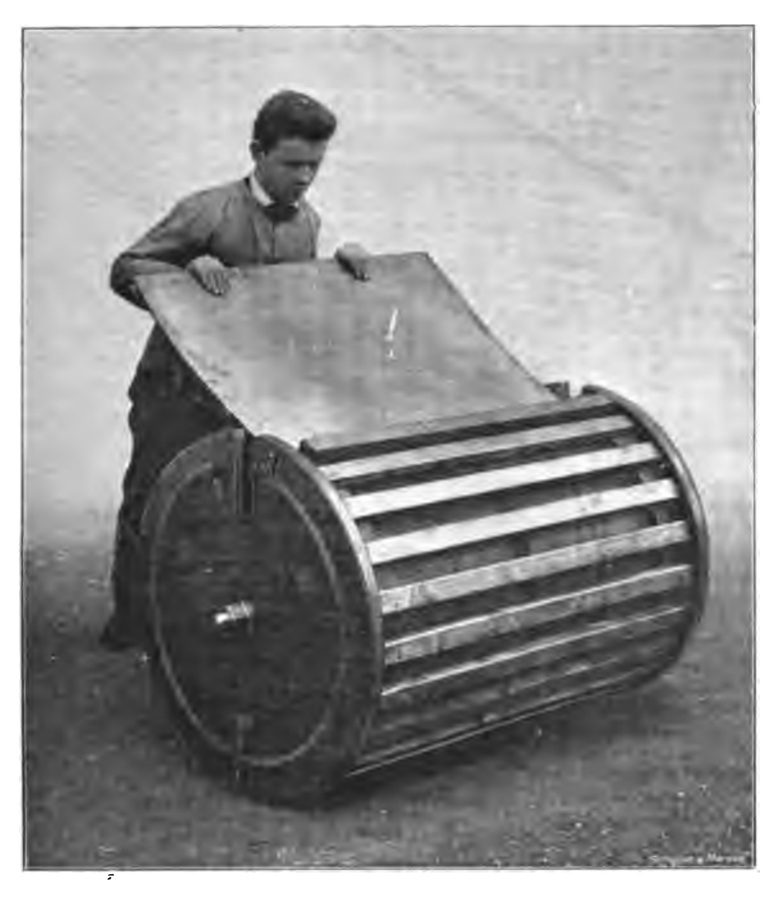


Fig. 283.

gegebenen Apparat entstehen. Bei diesem besteht das zu prüfende Blechpacket aus vier, vorher bereits mit Papier beklebten ganzen Blechtafeln mit den Normaldimensionen 200×100 cm und 0·5 mm Dicke. Diese werden zusammen in die aus Fig. 283 kenntliche Trommel eingeschoben, die eine feste Wickelung aus 120 Windungen starken Kupferdrahtes trägt, wie der schematische Querschnitt des Apparates in Fig. 284 erkennen läßt. Die Überlappungsart der Enden wird entweder durch Übereinanderpressen der Enden des ganzen Packetes, oder magnetisch weit besser, wenn auch mühsamer durch Übereinanderlegen der Enden je eines und desselben Bleches vorgenommen.

175. Kritische Vergleichung der Apparate. Trennung der Hysterese- und der Wirbelstromverluste.

Daß die Meßergebnisse der 3 Apparate völlig übereinstimmen, ist von vornherein nicht zu erwarten. Obwohl alle 3 darin übereinstimmen, daß sie einen mehr oder weniger vollständig geschlossenen magnetischen Kreis darstellen, der nur aus dem Prüfblech gebildet ist, so besitzt doch jeder von ihnen andererseits spezifische Eigentümlichkeiten, die als spezifische Fehlerquellen das Meßergebnis in der einen oder anderen Richtung, aber voraussichtlich einseitig beeinflussen werden. So der EPSTEINsche Apparat die vier in Reihe geschalteten Luftfugen mit den oben angeführten Wirkungen, der MÖLLINGERsche Apparat die spezifische Ungleichmäßigkeit der Induktion B aus den in **157** angeführten Gründen, endlich der RICHTERsche Apparat einen verhältnismäßig großen magnetischen Eisenwiderstand und eine die Wirbelstrombildung weniger gut ausschließende Vereinigung der Enden durch Überlappung.

Um diese spezifischen Eigentümlichkeiten oder Fehlerquellen in ihrem Einfluß auf das Endergebnis der Messung festzustellen, sowohl was die „Verlustziffer“ betrifft, als auch was die neuerdings wichtiger gewordene Trennung in Hysterese- und Wirbelstromverluste anlangt, bzw. die Berechnung der Koeffizienten h und β, hat sich die Phys. Techn. Reichsanstalt der dankenswerten Aufgabe unterzogen, sorgfältige vergleichende magnetische Untersuchungen mit diesen 3 Apparaten vorzunehmen.

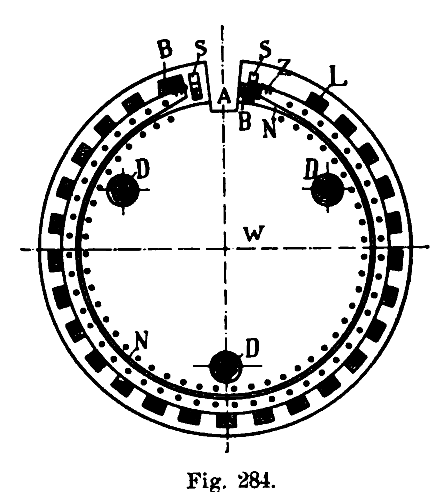


Fig. 284.

Das Endergebnis dieser Untersuchungen (siehe E. GUMLICH und P. ROSE ETZ 1905 Heft 17), welches sich aus dem Vergleich der Meßergebnisse von 5 Eisenproben mit jenen Apparaten einerseits, einem Ring von größeren Dimensionen andererseits unter Berücksichtigung aller in Betracht kommenden Momente ableiten läßt, ist folgendes:

1. „Der EPSTEINsche Apparat liefert den richtigen Wert für den Gesamtverlust bei 50 Perioden, also die richtige Verlustziffer, mißt jedoch den Hystereseverlust um ca. 3 % zu hoch, dementsprechend ist der gemessene Wirbelstromverlust zu korrigieren.

2. Der RICHTERsche Apparat gibt den Hystereseverlust richtig an, den Gesamtverlust für 50 Perioden um etwa 3% zu hoch; dementsprechend ist ebenfalls der Wirbelstromverlust zu korrigieren.

3. Die Angaben des MÖLLINGERschen Ringes sind identisch mit demjenigen des direkt bewickelten Ringes von gleichen Dimensionen. Wegen der Ungleichmäßigkeit der Magnetisierung empfiehlt sich ein Zuschlag von etwa 2% zur Verlustziffer, η und f [NB. in **171** mit h und β bezeichnet]. Im übrigen können geringfügige Änderungen des Dimensionsverhältnisses der im MÖLLINGERschen Apparat untersuchten Ringe außer Betracht bleiben.“

Aus den Untersuchungen ergeben sich weiterhin noch einige Angaben die teils für die Fehlerquellen, teils für die Benutzung der Apparate bemerkenswert erscheinen. Das $\cos\varphi$, welches für den EPSTEINschen Apparat, wie schon oben bemerkt, zwischen 0·2 und 0·3 beträgt, liegt beim RICHTER-

schen Apparat etwa zwischen 0·5 bis 0·6 und bei dem MÖLLINGERS zwischen 0·6 und 0·8. Die Stromwärmekorrektion $\tilde{J}^2 \cdot R$ beträgt für niedere Periodenzahlen bei EPSTEIN etwa 3 bis 4%, bei RICHTER wegen der verhältnismäßig hohen Stromstärken reichlich 10%, bei MÖLLINGER etwa nur 1 bis 2% der gemessenen Watt.

Die Untersuchungen zeigen ferner, daß, entgegen der von BENISCHKE gefundenen Abhängigkeit von h und β (vgl. I, 2 in **306**), es genügt, den Formfaktor f der benutzten Spannung zu bestimmen (**60**), um das gesuchte $\tilde{B}_{max}$ aus der Umsetzungsspannung $\tilde{E}_I$ in effektiven Volt richtig aus der Kraftliniengleichung (**143**)

$$\tilde{E}_I \cdot 10^8 = f \cdot 4 \cdot \tilde{B}_{max} \cdot q \cdot u \cdot w_I$$

berechnen zu können. Ebenso ergab sich, entgegen der voraussichtlich durch ungenügende Temperaturmessung zu erklärenden Ergebnisse BENISCHKES (siehe I, 2 in **306**, Fig. 413), die zur Bestimmung von h und β ermittelte Linie als vollkommene Grade. Hat man bei der in mancher Beziehung etwas schwierigen Temperaturmessung des Eisens bei Anwendung eines Quecksilberthermometers Fälschungen durch Wirbelstrombildung zu befürchten, so muß man eine nichtleitende Flüssigkeit, etwa Alkohol oder Toluol als Thermometerflüssigkeit in möglichst plattgedrücktem Glasgefäß verwenden.

Die nachträgliche Trennung der Gesamtverluste in Hysterese und Wirbelstromverluste mit Berechnung der Koeffizienten h und β zur Vergleichung verschiedener Bleche in rein magnetischer Hinsicht ist deshalb neuerdings von größerem praktischen Interesse geworden, weil jetzt auch für Wechselstrombleche die Eisenlegierungen mit hohem elektrischen Widerstandsfaktor ϱ (siehe hierzu I, 2 in **309**) benutzt werden, bei denen also die Wirbelstrombildung bzw. β sehr stark herabgedrückt wird. Weiteres über das Verfahren zur möglichst fehlerfreien Trennung der Verluste mit Hilfe der Messung der Gesamtverluste bei verschiedenen Periodenzahlen u und zur Berechnung von h und β siehe außer Hdb. I, 2 (**306**) in der angeführten Arbeit von GUMLICH und ROSE (ETZ 1905, Heft 17).

C. Dauermagnete.

176. Allgemeines.

Die Dauermagnete, welche früher in der Physik auf dem lange Zeit gesonderten Gebiet des Magnetismus eine so hervorragende Rolle spielten, daß sie dasselbe geradezu beherrschten, sind zwar durch den mit der Elektrotechnik emporkommenden Elektromagnetismus entthront worden (siehe hierzu I, 2 in **279**), vor der völligen praktischen Bedeutungslosigkeit hat sie aber gerade wiederum die Entwickelung der Meßtechnik bewahrt. Im besonderen sind es die modernen Drehspuleninstrumente und eine große Zahl wichtiger Elektrizitätszählertypen, deren Wert und Brauchbarkeit geradezu von der Güte, vor allem der Konstanz der in ihnen verwendeten Dauermagnete abhängt. Dadurch hat auch die Messung der magnetischen Größen an den Dauermagneten selbst wiederum an praktischer Bedeutung etwas gewonnen.

Die in Hdb. I, 2 Abschnitt V näher behandelte Natur des Dauermagnetismus bzw. der „permanenten Magnete" als Resterscheinung, die eine Folge der allgemeinen Hystereseerscheinung bei der speziellen Gruppe der

magnetisch harten Materialien, namentlich der gehärteten Stahlsorten bildet, bringt es mit sich, daß die Messungen an Dauermagneten viel weniger mannigfaltig sind als an elektromagnetischen Kreisen. Von den Ausgleichgrößen bleibt zur direkten Messung an bestimmt vorliegenden Dauermagneten eigentlich nur die Bestimmung der Kraftlinienzahl N bzw. der mittleren Kraftliniendichte $(B)_m$ im Magnetquerschnitt übrig, während alle übrigen Größen nur eine indirekte Ableitung zulassen, teils aus den Dimensionen, teils aus den Werten, welche die Untersuchung des für den Dauermagneten verwendeten Materiales nach einer der in den vorausgehenden Abschnitten angegebenen Methoden liefert.

177. Stabilität des Dauermagnetismus. Namentlich wird die Aufstellung der Hystereseschleife des verwendeten Materiales von der größten Bedeutung sein für die Beurteilung bzw. Berech-

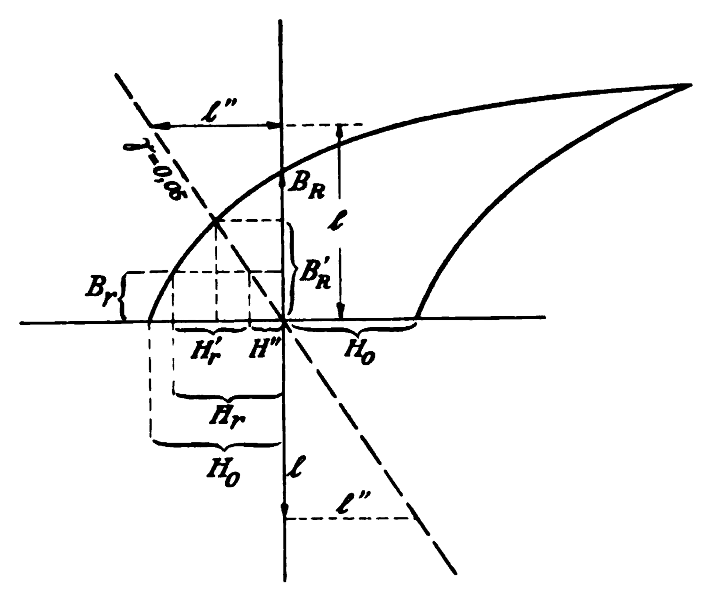


Fig. 285.

nung der beim fertigen Dauermagnet zu erwartenden Eigenschaften und Kraftlinienbeträge, sowie ihrer Stabilität oder Labilität (siehe hierzu I, 2 in **287**). Die charakteristischen Werte der Hystereseschleife, welche für ein bestimmtes B_{max}, das gewöhnlich nahe der Sättigung liegt, ermittelt worden ist (siehe Fig. 285, sowie I, 2 in **307** Fig. 416), sind Schleifeninhalt A in Erg und Koerzitivkraft H_0 einerseits, remanentes Feld bzw. Restinduktion B_R für $H = 0$ andererseits. Von diesen hängen A und H_0 aufs engste untereinander zusammen, insofern A sehr angenähert proportional mit H_0 wächst und beide reine Materialkoeffizienten darstellen, also praktisch unabhängig von der Kreislaufanordnung, d. i. der Größe der Scherung bzw. des Entmagnetisierungsfaktors γ sind. Hingegen ist die Restinduktion B_R nicht nur von dem Verlauf des absteigenden Astes der reinen B, H-Kurve abhängig, sondern auch von der Richtung der Scherungslinie (Entmagnetisierungsgeraden) γ, welche durch $(l'' : l)$, d. i. das Verhältnis der auf dem Magnetquerschnitt q reduzierten Länge l'' des Luftweges (**155**) zu dem Eisenweg l der Kraftlinien gegeben ist (siehe I, 2 in **292**). Für die Dauermagnete der Praxis, welche stets eine endliche Größe von l'' besitzen, da hierauf ihre Benutz-

barkeit beruht, wird also nicht der Wert B_R der ungescherten oder reinen $B.H$-Kurve in Betracht kommen, sondern derjenige Ordinatenwert, als äußerster, aber durchaus labiler Grenzwert B_R', welcher von der Scherungsgeraden aus der reinen Materialkurve ausgeschnitten wird (Fig. 285).

Bei den Dauermagneten der Praxis soll aber nicht dieser labile Feldzustand B_R' vorhanden sein, bei welchem das Sicherheitsgefälle H_r' gegen Änderungen durch vorübergehende äußere Entmagnetisierungseinflüsse den Wert Null besitzt. Da diese Einflüsse in Form von mechanischen oder elektromagnetischen Erschütterungen (Wellen) fast stets vorhanden sind, so wird der wirklich gewählte und meist aus B_R' durch künstliche Entmagnetisierung (Kugelmühlen) herbeigeführte wirkliche Zustand B_r kleiner sein, etwa wie in Fig. 285 angegeben. Alsdann bleibt von dem Gefälle H_r, das den Zustand B_r sichert, noch nach Abzug des vom Luftweg benötigten Gefälles H'' das Sicherheitsgefälle H_r', welches durch äußere Entmagnetisierungseinflüsse erst an Größe übertroffen werden muß, ehe B_r verkleinert wird und hierdurch die Konstanz des Dauermagneten verloren geht.

Aus dieser Betrachtung wird auch ohne weiteres klar, inwiefern eine Beseitigung des Luftstreckenwiderstandes durch Anlegen eines den magnetischen Kreis schließenden Eisenstückes (Ankers) die Sicherheit gegen Entmagnetisierung erhöhen muß. Da hierdurch H'' nahezu zu Null gemacht wird, hingegen B_r im Querschnitt der Magnetmitte im w e s e n t l i c h e n unverändert bleibt, so wird H_r' entsprechend bis auf H_r vergrößert und damit auch die Sicherheit gegen eine magnetische Zustandsänderung.

178. Ermittelung des magnetischen Gefälles.

Eine Messung der im vorstehenden erwähnten magnetischen Gefäll- bzw. Antriebsgrößen H für den Kreislauf von Dauermagneten ist bei dem Mangel eines magnetischen Spannungsmessers (vgl. **126**) auch nicht direkt möglich, sondern ihre Ermittelung kann nur auf Umwegen geschehen. Direkt meßbar ist die Materialgröße H_o, welche erforderlich ist, um den völlig unmagnetischen Zustand nach einem vorausgegangenen B_{max} herbeizuführen. Diese Größe H_o folgt ebenso wie B_R bzw. B_R' (Fig. 285) aus der Aufnahme der Hystereseschleife, die nach einer der in **163** bis **166** angegebenen Methoden ermittelt wird, da hier nur die statische Hystereseschleife in Betracht kommt. Der wirkliche Zustand B_r eines Dauermagneten in der Magnetmitte kann nach einem der Verfahren in **179** bis **181** bestimmt werden; wird jetzt außerdem noch der Wert von γ, sei es rechnerisch aus den Dimensionen, oder, wo dies nicht angängig, aus dem magnetischen Widerstand eines Elektromagneten von genau gleicher Dimensionierung mit Berechnung von l'' (siehe **155, 156**) abgeleitet, so sind alle erforderlichen Unterlagen zur Ermittelung von H_r, H_r' und H'' an der Hand des Diagramms der Fig. 285 gegeben. Für einen Dauermagneten, dessen Material in seinen charakteristischen magnetischen Größen nicht bekannt ist, kann ohne Veränderung bzw. Vernichtung seines magnetischen Zustandes überhaupt nur H'' angenähert aus dem experimentell ermittelten B_r und den Dimensionen des Magneten bzw. seines Luftweges errechnet werden.

179. Messung von N und B Magnetometermethode.

Die Messung des magnetischen Feldes eines Dauermagneten läßt für die praktische Verwendung auch nur eine sehr beschränkte Zahl der in **129 ff.** angegebenen Methoden zur Feldmessung übrig. Zunächst kommen alle Methoden in Fortfall, welche mit Feldumkehrung arbeiten. Aber auch von den dort zur Messung von stationären Gleichfeldern angeführten Methoden sind nur wenige geeignet, da die prozentuale Zuverlässigkeit der übrigen

meist nicht ausreichen dürfte, so die Ermittelung von N bzw. B aus der Abreißkraft (**139**), die aber in vereinzelten Fällen für angenäherte Messungen wohl noch in Frage kommt, ferner die Bestimmung von B mit der Wismutspirale (**141**), die wegen der kleinen Änderungen der Werte unter 1000 Kraftlinien auf 1 cm² (siehe Fig. 253b) in Verbindung mit der vielfach zu geringen Homogenität von B bei den Feldern der Dauermagnete meist versagen dürfte. Die Methoden, welche praktisch überwiegend in Betracht kommen, sind Magnetometermethoden und Induktionsmethoden mit bewegter Prüfspule.

Die Ermittelung des Dauermagnetfeldes mit Hilfe des Magnetometers ist, abgesehen von der in **131** erwähnten Beschränkung auf magnetisch ungestörte Räume, weiterhin auf Stabmagnete beschränkt, da nur bei diesen die symmetrische Feldverteilung nach allen Richtungen eine ausreichend zuverlässige Anwendung der rechnerischen Beziehungen erlaubt.

Ist die Horizontalintensität H_h am Meßort bekannt oder ermittelt (siehe **128**), so kann nach der in Fig. 237 angegebenen Meßanordnung unter Ersetzen des elektromagnetisch erregten Prüfstabes durch den Dauermagneten die Polintensität $I = \frac{B_r}{4\pi}$ des Dauermagneten durch Zurückführung auf H_h gemessen werden zu

$$I = \frac{B_r}{4\pi} = \frac{H_h \cdot s^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{q \cdot l} \quad \text{oder} \quad N_r = \frac{4\pi \cdot H_h \cdot s^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{l}.$$

Natürlich kann man auch anstelle der „zweiten Hauptlage" die „erste Hauptlage" verwenden, d. h. das in **128** (Fig. 235) angegebene Meßverfahren von Gauss mit Variation der Entfernung des Dauermagneten in der Ost-West-Lage benutzen, um zunächst das magnetische Moment $M = I \cdot l = \frac{B_r \cdot l}{4\pi}$ des Dauermagneten zu

$$M = \frac{H_h}{2} \cdot \frac{d_1^5 \operatorname{tg} \alpha_1 - d_2^5 \operatorname{tg} \alpha_2}{d_1^2 - d_2^2}$$

zu ermitteln und hieraus I bzw. B_r oder N_r abzuleiten.

Zur Ermittelung von M ist auch das rein mechanische Bestimmungsverfahren in **128** ohne Benutzung eines Magnetometers anwendbar, wobei sich auf Grund der dort angeführten Formel ergibt:

$$M = \frac{1}{H_h} \cdot \frac{\pi^2 T}{\tau^2 (1 + D)}.$$

Alle diese Methoden werden aber deshalb geringere praktische Bedeutung besitzen, weil in der Technik die Anwendung von stabförmigen Magneten die Ausnahme, dagegen die Benutzung irgendwie gestalteter Hufeisenmagnete die Regel bilden wird.

180. Zugkraftsmethode und Induktionsmethode. Bei geeigneter Gestaltung der Enden wird eine angenäherte Bestimmung von $N = (B)_m \cdot q$ durch Messung der Abreißkraft Z möglich sein, welche erforderlich ist, um ein gleichmäßig mit dem Querschnitt q anliegendes Ankerstück aus weichem Eisen abzureißen (siehe hierzu in **139**). Die so gefundenen Werte, nämlich Z in kg und q in cm², liefern

$$(B)_m = 10^3 \sqrt{24{\cdot}7 \cdot \frac{Z}{q}} \quad \text{oder} \quad N = 10^3 \sqrt{24{\cdot}7 \cdot Z \cdot q} \text{ Kraftlinien,}$$

werden aber aus verschiedenen Gründen eine geringere Zuverlässigkeit besitzen. Zunächst werden nicht alle Kraftlinien N das Ankereisen durchsetzen.

namentlich aber wird $(B)_m$, d. h. die Verteilung des Feldes über den Querschnitt, nicht homogen sein, teils wegen der verschieden langen Wege, teils wegen ungleichmäßigen Anliegens.

Die zuverlässigste Methode wird daher in diesen Fällen die Messung der Induktionswirkung in einer gegenüber dem Feld bewegten Leiteranordnung sein. Für absolute Messungen kommt in erster Linie die Ermittelung der Integralspannung $\int e \cdot dt$ in einer bewegten Prüfspule mit der Windungszahl w mit Hilfe des Schwingungsgalvanometers in Frage, wie eingehender in **144** behandelt; für vergleichende Messungen kann auch die Ermittelung der Bremswirkung in derselben Bremsscheibe verwendbar sein.

Die elektrische Seite der erstgenannten Methode wurde bereits früher (**144**) behandelt, so daß hier nur die Bemerkungen über die Anordnung der Prüfspule noch nachzutragen bleiben. Für Stabmagnete ist die Ausführung einfach: Eine möglichst anliegende Prüfspule wird mit einer für das verwendete Schwingungsgalvanometer passend gewählten Windungszahl w (**144**) über der Mitte des Stabmagneten angeordnet, wie Fig. 260 in **146** andeutet. Nach Anschalten an den Schwingungsgalvanometerkreis wird diese Prüfspule rasch über ein Ende des Magneten herausgezogen und möglichst weit aus seinem Bereich entfernt. Bei großer Schwingungsdauer τ des Galvanometers wäre durch rasches Herausziehen, Herumdrehen der Spule und Wiederzurückbringen in die Ausgangsstellung eine Verdoppelung des Induktionsstoßes möglich, doch wird τ für die hierfür erforderliche Zeit wohl vielfach nicht groß genug sein.

Schwieriger liegen die Verhältnisse häufig bei Hufeisenmagneten, falls eine Verbreiterung der Polschuhe, oder bei Lamellenmagneten, falls die zusammenhaltenden Schrauben eine ausreichende Verschiebung der Prüfspule erschweren oder unmöglich machen. Vielfach wird auch die Krümmung eine Verschiebung über die volle halbe Magnetlänge nicht recht zulassen. In solchen Fällen verfährt man dann am besten so, daß man ein hinreichend großes Weicheisenstück als Anker wählt, die Wickelungen der Prüfspule fest um die Mitte dieses Ankereisens legt und den Induktionsstoß in der Spule beim Anlegen und beim Abreißen des Ankers bestimmt. Der Mittelwert aus beiden Ausschlägen wird zwar alsdann nicht alle, aber doch angenähert alle Kraftlinien $\overline{N}_r$ des Dauermagneten zur Messung bringen.

181. Vergleich der nutzbaren Felder. Temperaturkoeffizient.

In zahlreichen Fällen handelt es sich nicht so sehr um eine Messung der absoluten Größe des Kraftlinienfeldes bei Dauermagneten, als vielmehr um den Vergleich der wirksamen Felder verschiedener Magnete bzw. Magnetformen. Dieser Vergleich ist auch unter Benutzung der Dauerinduktion als Mittelglied der Messung möglich. Läßt man zwischen den Schenkeln eines Hufeisenmagneten eine Metallscheibe, etwa eine Kupferscheibe, gleichförmig rotieren, so kann die zwischen Achse und Umfang, wie bei der sog. Faradayscheibe, gemessene Gleichspannung als Vergleichsmaß für das wirksame Feld $\overline{N}_r$ bei gleichgestalteten Magneten und gleicher Geschwindigkeit bzw. Tourenzahl der Scheibe dienen, da die Induktionsgleichung in diesem Fall die Form

$$\overline{E}_{Volt} = \overline{B}_r \cdot l \cdot (v)_m \cdot 10^{-8} = \overline{N}_r \cdot n'' \cdot 10^{-8}$$

annimmt, wenn $(v)_m$ die Geschwindigkeit der Scheibe in cm im Schwerpunkt des Feldes angibt und l die Länge des Feldes in Richtung des Scheibenradius bezeichnet, bzw. n'' die sekundliche Tourenzahl der Scheibe.

Wichtiger als diese unmittelbare Messung der in einer Scheibe induzierten Spannung $\overline{E}$ wird die Messung der aus dieser Spannung folgenden Bremswirkung sein. Da die Scheibe gleichzeitig eine Kurzschlußbahn darstellt, deren resultierender Widerstand R_w bei derselben Temperatur und gleicher Induktionslänge als eine konstante Größe betrachtet werden kann, so wird die in Wärme umgesetzte elektrische Leistung $(\overline{E}^2 : R_w)$ Watt betragen. Wird somit diese als Kurzschlußbremse wirkende Scheibe von einem kleinen Elektromotor angetrieben, als welche z. B. auch die Werke der Elektrizitätszähler nach der Motortype anzusehen sind, so erlaubt eine Differenzmessung der elektrischen Leistung bei derselben Tourenzahl, einmal ohne, einmal mit Dauermagnet die Bremsleistung $(\overline{E}^2 : R_w)$ verhältnismäßig einfach zu messen. Da nun $\overline{E}$ direkt proportional mit N_r, der wirksamen Kraftlinienzahl des zur Bremsung benutzten Dauermagneten, wächst, so ist ein Vergleich dieser Größe bei verschiedenen Magneten, aber unter Benutzung derselben Bremsscheibe gut ausführbar. Bei gleicher Tourenzahl wird sich

$$\overline{N}_r' : \overline{N}'' = \sqrt{(\Delta W') : (\Delta W'')}$$

verhalten, wenn ΔW die oben bezeichneten elektrischen Differenzleistungen in irgend einer passenden Einheit bezeichnet, während bei Anwendung konstanter Antriebsleistung zum Betrieb der Bremsscheibe unter der Voraussetzung vernachlässigbar kleiner Leerlaufverluste (gegenüber der Bremsleistung) die Beziehung folgt

$$N_r' : N_r'' = n'' : n',$$

wenn n die Tourenzahlen bezeichnet.

Soll der für Dauermagnete zuweilen bedeutungsvolle Temperaturkoeffizient von $\overline{N}_r$ ermittelt werden, so würde dies die Anwendung einer der vorstehend angeführten Methoden bei demselben Dauermagnet, aber bei hinreichend verschiedenen Temperaturen, falls nötig unter Benutzung eines Thermostaten, erfordern, doch ist die Durchführung solcher Messungen mit größeren Schwierigkeiten verknüpft und liefert wegen der Kleinheit jenes Koeffizienten (siehe I, 2 in **312**) und der geringen prozentualen Zuverlässigkeit der meisten magnetischen Meßergebnisse gewöhnlich nur ungefähre Werte für jenen Koeffizienten.

Namenregister.

(Zu Abteilung 4.)

(Die angegebenen Zahlen bedeuten die Seiten.)

Sachregister.

(Zu Abteilung 4.)

(Die angegebenen Zahlen bedeuten die Seiten.)

Fünfte Abteilung.

Die technischen Messinstrumente

bearbeitet

von

R. O. Heinrich

und

Dipl. Ing. D. Bercovitz.

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
416499
ASTOR, LENOX
TILDEN FOUNDATIONS
1908

Vorwort zur fünften Abteilung.

Die Ausarbeitung des folgenden Abschnittes über technische Meßinstrumente wurde mit der Absicht übernommen, außer der allgemeinen Beschreibung der verbreitetsten und markantesten elektrischen Meßinstrumente eine kritische Vergleichung verschiedener Fabrikate desselben Systems nach Möglichkeit durchzuführen. Diese Absicht hat leider den gewünschten Anklang nicht gefunden, so daß die Mitteilung der notwendigen Angaben für eine derartige kritische Behandlung von den meisten Fabrikanten, besonders aber von den außerdeutschen, verweigert wurde. Dies ist um so mehr zu bedauern, als bereits vorhandenes Material durch den auf diese Weise ausgedrückten Wunsch der betreffenden Fabrikanten der Veröffentlichung entzogen werden mußte. Aus dem gleichen Grunde konnten die kritischen Zusammenfassungen einzelner Typen nicht vervollständigt werden, wodurch anscheinende Lücken in dieser Beziehung erklärt werden müssen. Um so mehr soll denjenigen Firmen, die uns mit den gewünschten Angaben und durch Überlassung von Preisblättern, Abbildungen usw. an die Hand gingen, unser besonderer Dank hiermit zum Ausdruck gebracht werden.

Besonderen Wert legten wir auf Diskussion der Fehlerquellen und auf Winke für sachgemäße Behandlung der technischen Meßinstrumente. Wir hoffen, damit dem Nichtspezialisten Erfahrungen zugute kommen zu lassen, wie sie nur der in der speziellen Praxis stehende Fabrikant im Laufe der Jahre sammeln kann. Eine Anzahl der Angaben und Besprechungen werden dem Eingeweihten selbstverständlich und überflüssig erscheinen. Nach eigener Erfahrung ist jedoch in der Wahl des Materials nichts gegeben, was nicht einen erzieherischen Wert bezüglich der Behandlung und Beurteilung der Funktionen eines technischen Meßinstrumentes besitzt.

Auf Wunsch des Herausgebers wurden, um Wiederholungen zu vermeiden und den einheitlichen Charakter des ganzen Werkes zu wahren, auf die bereits in Band II, 1 bis 4 behandelten Meßmethoden und Apparate lediglich hingewiesen. Die in unserer Arbeit anscheinend vorhandenen Lücken möchten durch diese Hinweise ausgefüllt sein.

In die Bearbeitung des Ganzen haben wir uns so geteilt, daß die Einleitung, sowie das Kapitel über Instrumente der WESTON-Type von Herrn HEINRICH, der beschreibende Teil der übrigen Meßsysteme und die redaktionelle Arbeit von Herrn BERCOVITZ geliefert wurden.

Aus der spärlich in Buchform erschienenen Literatur wurden besonders die folgenden Spezialwerke herangezogen, aus denen mit Genehmigung der Verlagshandlungen von VIEWEG & SOHN in Braunschweig, BLACKIE & SON. Ltd. in Glasgow auch einige Abbildungen (Fig. 41, 44, 46, 47, 58, 61, 62. 83, 83[a]) benutzt wurden:

FRÖLICH, Dr. O., Die Entwickelung der elektr. Meßungen

KITTLER, Prof. Dr., Handbuch der Elektrotechnik.

ARMAGNAT, „Instruments et méthodes de mesures électriques industriels“.

PARR G. D. ASPINALL, Electrical engeneering measuring instruments.

SWINBURN, The measurement of electric currents.

Berlin, im Juni 1907.

Die Verfasser.

Inhaltsverzeichnis.

A. Allgemeine Gesichtspunkte über den Bau technischer Meßinstrumente.

B. Beschreibung der gebräuchlichsten technischen Instrumente.

I. Weston-Instrumente.

II. Weicheiseninstrumente.

III. Elektrodynamische Instrumente.

A. Allgemeine Gesichtspunkte über den Bau technischer Mefsinstrumente.

---

1. Vorbemerkungen.

Die Fülle von technischen Meßwerkzeugen, welche die Elektrotechnik schon besitzt und für welche der Anspruch größter Genauigkeit und Zweckmäßigkeit gemacht wird, ist geeignet, dem der Fabrikation Fernstehenden die richtige Wahl zu erschweren. Im Folgenden soll der Versuch gemacht werden, die praktisch wichtigsten Gesichtspunkte zu besprechen, deren Kenntnis zur sachgemäßen Beurteilung der technischen Meßinstrumente notwendig ist.

Mit Vorliebe bezeichnet man Instrumente, für welche besondere Genauigkeit beansprucht wird, mit dem Klassennamen „Präzisionsinstrumente". Das Eigenartige dieses Sprachgebrauches liegt darin, daß man für diese Bezeichnung das den Instrumenten zugrunde liegende Prinzip als ausschlaggebend annimmt, meist ohne besondere kritische Beurteilung der Güte und Zweckmäßigkeit der Ausführung.

Die bei der Konstruktion elektrischer Meßinstrumente zu lösenden Aufgaben zwingen zu Kompromissen zwischen mechanischen und elektrischen Eigenschaften, deren richtiges Treffen die Zweckmäßigkeit und Gebrauchsfähigkeit eines Meßinstrumentes bestimmt. Das vortrefflichste Prinzip kann durch fehlerhafte Konstruktion für die Zwecke der Präzisionsmessung untauglich gemacht werden, so daß ein mehr oder weniger detailliertes Eingehen auf die Konstruktionseigenheiten der wichtigsten Instrumente zur Beurteilung deren Gebrauchsfähigkeit als Präzisionsinstrumente unbedingt notwendig ist.

Die für die Technik weitaus wichtigsten Instrumente sind die sogenannten tragbaren Apparate mit direkter Ablesung. Diese werden bei den technischen Messungen als praktische Normalien zugrunde gelegt und müssen daher den weitgehendsten Anforderungen gerecht werden. In der nachfolgenden Besprechung werden uns diese Apparate daher fast ausschließlich beschäftigen und die meist geringfügigen, oft rein äußerlichen Unterschiede zwischen den tragbaren und sogenannten stationären Instrumenten im Zusammenhang mit der Besprechung der betreffenden Instrumentenklasse hervorgehoben werden.

In zweiter Linie kommen die indirekt zeigenden Instrumente in Frage. Bei diesen Instrumenten geht der eigentlichen Messung eine besondere Manipulation, wie das Spannen einer Torsionsfeder, das Verschieben und

Auflegen von Gewichten oder das Abgleichen und Einstellen von Widerständen voraus. Eine scharfe Trennung dieser zwei Arten, der direkt und indirekt anzeigenden Instrumente ist kaum angängig, indem eine ganze Anzahl von technisch wichtigen und gebräuchlichen Apparaten eine Mittelstellung dadurch einnehmen, daß direkt zeigende Instrumente zu bestimmten Zwecken mit indirekten Meßmethoden vereinigt sind. Dies gilt ganz besonders von den sehr wertvollen Kompensationsmethoden vermittelst Widerständen und Normalelementen und für solche direkt zeigenden Instrumente, bei denen eine Verschiedenheit der Meßbereiche durch Auflage besonderer, dazu bestimmter Gewichte erreicht wird.

2. **Genauigkeit.** Bei der kritischen Beurteilung technischer Meßinstrumente interessiert uns vor allen Dingen die mit demselben zu erreichende Genauigkeit.

Einem beliebten Gebrauch zufolge wird diese Genauigkeit unzulänglicher Weise in Prozenten angegeben mit der meist stillschweigenden und dadurch unbestimmten Annahme, daß sich diese prozentuale Genauigkeit auf den maximalen Sollwert des in Frage kommenden Meßbereiches des Instrumentes bezieht. Eine prozentuale Genauigkeitsangabe für den Sollwert der jeweiligen Ablesung entspricht nicht dem Wesen eines direkt zeigenden Instrumentes. Die Ablesung dieser Instrumente erfolgt in Skalenintervallen und deren Bruchteilen, und der in praktischen elektrischen Einheiten gesuchte Wert muß sich in den weitaus meisten Fällen nachträglich durch die Multiplikation dieser Ablesung mit einer Konstanten ergeben. Die für ein solches Instrument anzugebende Genauigkeit wird von dem Charakter der Skala, der Genauigkeit der Zeichnung derselben und der Grenze der einwandsfreien Ablesung abhängen.

Die proportionale, d. h. die gleichmäßig unterteilte Skala ist das angestrebte Ideal der Instrumententechnik. Wenn auch diese Gleichmäßigkeit für einzelne Instrumente unter Anwendung besonderer subtiler Manipulationen erreichbar erscheint, so ist sie für die Herstellung im großen wohl kaum erreichbar. Untersucht man Instrumente, welche dem Prinzip nach ganz gleichmäßige Skalen besitzen sollten, so findet man meist unregelmäßig verlaufende Skalenabweichungen bis zu $^3/_{10}$ und $^4/_{10}$ eines Intervalles, ohne daß man diese auf ein mechanisch unzulängliches Funktionieren des Instrumentes zurückführen kann. Die Korrektionskurve für eine derartige Skala zeigt alsdann keinen glatten, sondern einen zickzackartigen Verlauf.

Die Bedingungen für eine möglichst gleichmäßig und proportional verlaufende Skala sind in demjenigen technischen Instrument vorhanden, in welchem sich ein Leiter, der den zu messenden Strom führt, in einem gleichförmigen magnetischen Felde bewegt. Dies ist der Fall in dem von Weston zuerst am sorgfältigsten durchkonstruierten Instrumente, in welchem sich der den Meßstrom führende Leiter in Form einer rechteckigen Spule in einem durch Dauermagneten gebildeten homogenen magnetischen Feld dreht. Die größtmöglichste Homogenität des Magnetfeldes wird durch die Polschuhe, die an den Polen des Dauermagneten befestigt sind und durch einen in der zylindrischen Bohrung der Polschuhe konzentrisch angeordneten Eisenkern erreicht. Trotz der außerordentlichen Präzision, welche durch die Verbesserung der notwendigen Hilfswerkzeuge im Laufe der jahrelangen Fabrikation erreicht worden ist, wird auch für diese Apparate nur eine angenäherte Proportionalität der Skala erreicht, so daß nach wie vor an einer empirischen

Herstellung der Skala festgehalten wird. Die folgenden Versuche sollen die Berechtigung dieses Verfahrens zeigen:

Ein Weston-Voltmeter sorgfältigster Ausführung ist mit einer mechanisch hergestellten, gleichmäßigen Skala von 150 Intervallen versehen. Die Prüfung der Proportionalität der Zeigerausschläge wird von 2 zu 2 Einheiten vorgenommen und ergibt das in Fig. 1, I dargestellte graphische Bild. Dasselbe Instrument wurde nach diesem Versuch auseinandergenommen und ohne Änderung wieder zusammengesetzt. Fig. 1, II zeigt das nunmehrige graphische Bild der Abweichungen. Das Zusammensetzen des Apparates war absichtlich

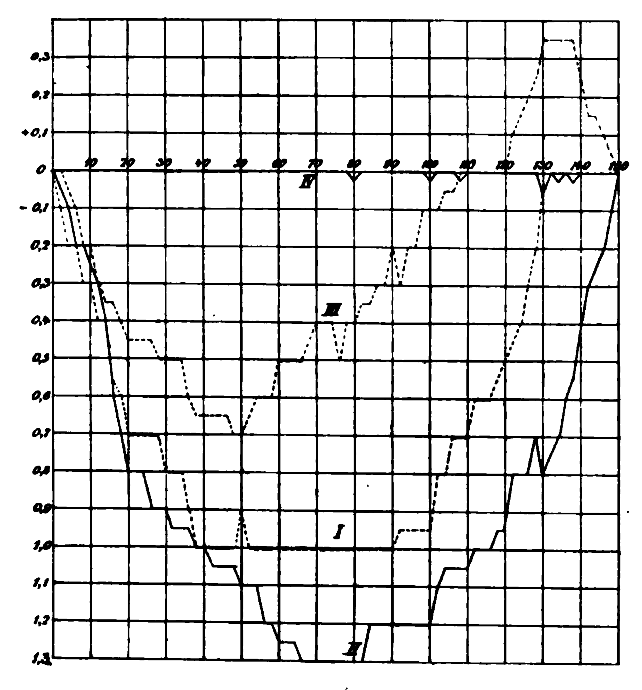


Fig. 1.

nicht mit allen Vorsichtsmaßregeln erfolgt, und ein nachträgliches Anziehen der das System haltenden Schrauben ergab das in Fig. 1, III dargestellte Bild der Skala. Die außerordentliche Veränderung des Skalencharakters der 3 verschiedenen Skalen ist bemerkenswert und möchte zur Genüge dartun, wie hoffnungslos die Versuche für eine Massenfabrikation ausfallen müssen, derartig proportionale Skalen selbst für die Instrumente der Weston-Type zu erhalten, so daß deren Abweichung in einer genauen Gleichförmigkeit weniger als 0·2 eines Skalenteiles betragen soll. In Fig. 1, IV ist die empirisch von 5 zu 5 Intervallen geeichte Skala für das gleiche Instrument dargestellt. Die Unterabteilungen zwischen den Eichpunkten sind mit einer Teilmaschine gleichförmig hergestellt. Die Abweichungen von absoluter Proportionalität betragen im Maximum 0·05 eines Intervalles. Die zur Herstellung der Skala verwendete Eichmethode gewährleistet eine gleichmäßige Genauigkeit von 0·05 % des Sollwertes. Der sehr gleichmäßige Verlauf der Skalenabweichungen ist ohne Zweifel dem geringen interpolaren Luftzwischenraum zuzuschreiben, der den Weston-Instrumenten eigen ist. Trotzdem zeigen sich auch bei diesen noch sprungweise Abweichungen bis zu 0·1 eines Intervalles.

Fig. 2, I zeigt die Eichungskurve eines Instrumentes der WESTON-Type, für die eine angenäherte Proportionalität ursprünglich durch ein Ausfeilen der Polschuhe angestrebt worden war. Die Skalenabweichungen waren vom Fabrikanten von 10 zu 10 Intervallen angegeben und betrugen im Maximum 0·3 eines Intervalles. Kurve I Fig. 2 wurde aufgenommen, nachdem das

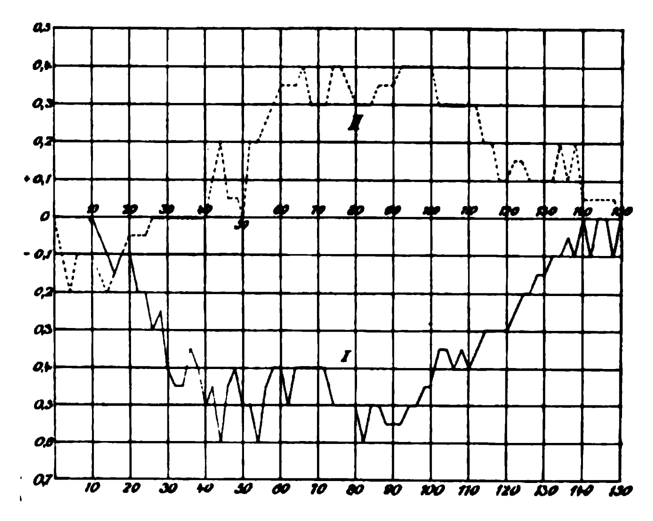


Fig. 2.

Instrument auseinander genommen und sorgfältig wieder zusammengesetzt war. Die Abweichung beträgt bereits im Maximum 0·6 eines Intervalles. Durch abermaliges Befeilen der Polschuhe wurde die Erreichung größerer

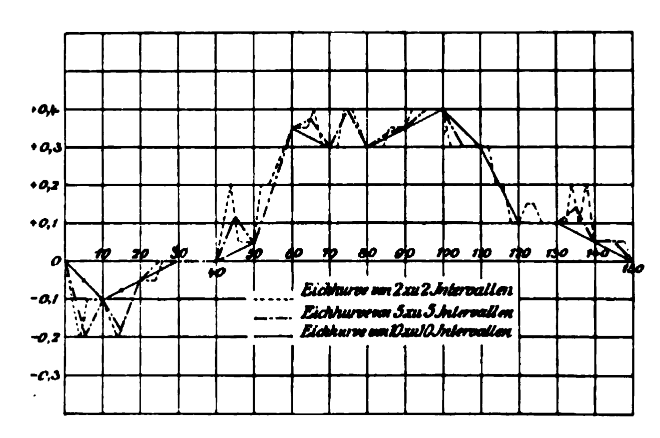


Fig. 3.

Proportionalität angestrebt, allerdings mit mäßigem Erfolg. Es zeigte sich, daß bereits eine verschiedene Anziehung der Befestigungsschrauben, durch welche das Magnetsystem an dem Instrumentensockel befestigt ist, eine wesentliche Veränderung des ganzen Charakters der Skala herbeiführte. Die erhebliche, sprungweise Abweichung dieser Skalen möchte auf den großen interpolaren Luftzwischenraum (2 mm) und auf die durch Befeilen unregelmäßig gewordene Form derselben zurückzuführen sein.

In Fig. 3 ist die Eichkurve der Fig. 2, II nochmals gestrichelt gezeichnet und eine zweite Eichkurve, welche die von 5 zu 5 Intervallen sowie eine dritte, welche die von 10 zu 10 Intervallen gefundenen Werte verbindet. Aus dieser Kurve ist ersichtlich, daß zwischen den zur Korrektion benutzten Eichpunkten Abweichungen bis zu $^3/_{10}$ eines Intervalles stattfinden, welchen die Eichkurve von 10 zu 10 Intervallen keine Rechnung trägt. Die dritte Kurve der Korrektion von 5 zu 5 Intervallen zeigt ein wesentlich besseres Anschmiegen an die eigentliche Korrektionskurve.

8. Korrektionskurve.

Die Bestimmung der Korrektionskurve des Meßinstrumentes ist, wenn dieselbe sorgfältig geschieht, eine zeitraubende Arbeit. Es empfiehlt sich daher, abgesehen von dem dem Instrument etwa anhaftenden proportionalen Fehler der Abweichung vom Sollwert, eine Korrektionskurve der Skala selbst anzufertigen, indem man den Anfangs- und Endpunkt der Skala als Fixpunkt annimmt und den Sollwert für möglichst viele Skalenpunkte be-

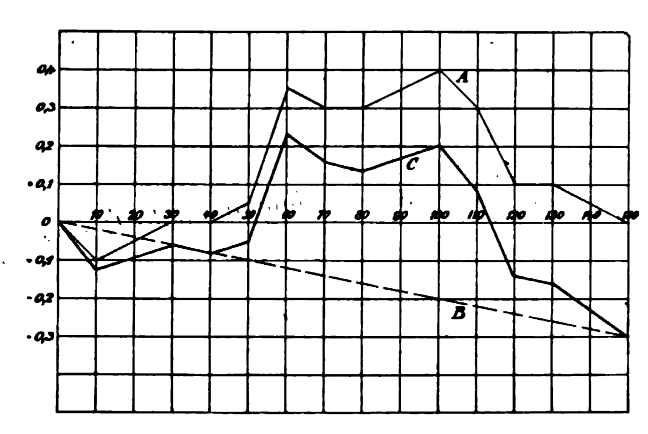


Fig. 4.

stimmt. Die so erhaltene Kurve, z. B. Fig. 3, voll ausgezogene Linien, bleibt typisch für das betreffende Instrument. Diese Kurve ist in Fig. 4 in *A* wiederholt. Darauf bestimmt man den wirklichen Wert des Endpunktes in der der Eichung des Instrumentes zugrunde liegenden Einheit. Dieser so bestimmte Wert, für das Diagramm zu — 0·2 % angenommen, gibt die proportionale Abweichung des Instrumentes vom Sollwert. Diese Abweichung stellt sich als gerade *B* dar, Fig. 4. Durch algebraische Summierung der beiden Kurvenwerte erhält man eine dritte Kurve *C*, welche die jeweilige Korrektionskurve darstellt. Dieses Verfahren hat, wie erwähnt, den Vorteil, daß die Skalenkorrektion ein für allemal festliegt und die Bestimmung des Instrumentenfehlers an einem Punkt, und zwar dem Endpunkt der Skala genügt, um eine ziemlich genaue Korrektion des Instrumentes für alle Skalenpunkte zu erhalten. Bestimmt man aus Kurve *C*, Fig. 4, die prozentuale Korrektion, so erhält man:

Teilstrich	Korrektion des Sollwertes in Prozent
10	+ 1·2
20	+ 0·45
30	+ 0·2
40	+ 0·2

Teilstrich	Korrektion des Sollwertes in Prozent
50	+ 0·1
60	— 0·4
70	— 0·2
80	— 0·17
90	— 0·2
100	— 0·2
110	— 0·08
120	+ 0·1
130	+ 0·12
140	+ 0·15
150	+ 0·2

Die Angabe der für den Endpunkt erhaltenen Korrektion von — 0·2 % würde demnach im allgemeinen falsche Resultate für die übrigen Skalenpunkte ergeben haben.

Das über die Skalenkorrektion Gesagte soll dazu dienen, daß der Eindeutigkeit halber für Instrumente mit annähernd proportionaler Skala die zu

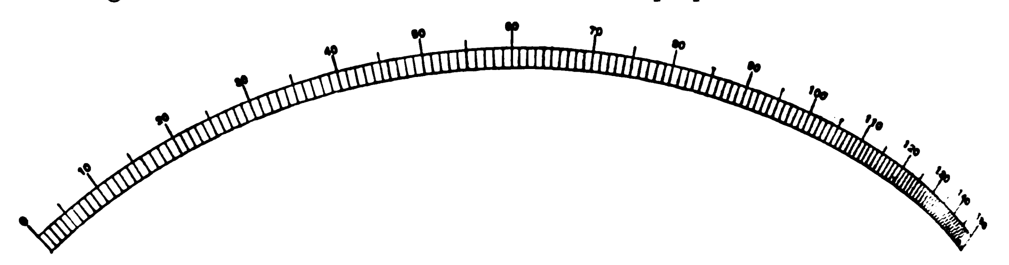


Fig. 5.

garantierende Genauigkeit, also auch die Korrektion in Dezimalen eines Skalenintervalles, und nicht in Prozenten angegeben werde.

Etwas komplizierter gestalten sich die Verhältnisse bei Skalen mit ungleichförmig verlaufender Teilung. Derartige Skalen sind charakteristisch für die meisten elektrodynamometrischen Instrumente, d. h. solche, denen die Aufeinanderwirkung zweier stromdurchflossener Solenoide zugrunde liegt ferner für die Weicheisen- und Hitzdrahtinstrumente. Die genaue empirische Eichung derartiger Skalen begegnet bereits größeren Schwierigkeiten, indem man sich begnügt, zwischen den gewählten Eichpunkten gleichmäßig zu unterteilen. Man wird den Abstand der Eichpunkte allerdings so wählen müssen, daß die gleichmäßige Unterteilung zwischen denselben keine größere Abweichung von dem wirklichen Skalenverlaufe zur Folge hat, als diejenige, welche die für die Genauigkeit der Skala festgesetzte Grenze zuläßt. Eine Beeinträchtigung der Ablesungsgenauigkeit selbst für derartige Skalen besteht darin, daß ein richtiges Interpolieren der Bruchteile eines Skalenintervalles einem darin wenig geübten Auge schwieriger wird, als dies bei der merklich proportionalen Skala der Fall ist. Fig. 5 zeigt eine typische Skala eines WESTON-Wattmeters. Die Teilung dieser Skala verengt sich merkbar im zweiten Drittel derselben. Eine derartige Skala besitzt den Vorteil, daß die Ablesung im Anfang und der Mitte derselben wegen der größeren Skalenintervalle mit größerer Genauigkeit gemacht werden kann als gegen das

Ende zu. Die prozentuale Ablesegenauigkeit ist dadurch größer als bei einer proportional geteilten Skala.

Ungünstiger sind die Verhältnisse für eine Skala der typischen Form Fig. 6, wie sie den elektrodynamischen Volt- und Amperemetern und den elektrostatischen Instrumenten mit direkter Ablesung eigen ist. Hier sind die Skalenintervalle am Anfang und am Ende der Skala stark verengt. Bei diesen Skalen wird man sich auf denjenigen Teil beschränken, innerhalb welchem eine genügende Genauigkeit der Ablesung stattfinden kann.

In Anbetracht der Schwierigkeiten, denen man bereits bei der Herstellung genauer Skalen für Instrumente mit proportionalen Skalen begegnet, wird man zu der Überzeugung kommen, daß die Skalengenauigkeit für Instrumente mit ungleichmäßig verlaufender Skala eine erheblich geringere sein muß.

Die eingehende Behandlung der Skalenfrage soll besonders vor der Angabe und Annahme zu großer Genauigkeiten warnen und zugleich auf die Notwendigkeit einer sorgfältigen Untersuchung der Instrumente auf diese Punkte hinweisen.

Es bedarf der allersorgfältigsten mechanischen Ausführung eines Instrumentes und der gewissenhaftesten Eichung der Skala, um für Instrumente

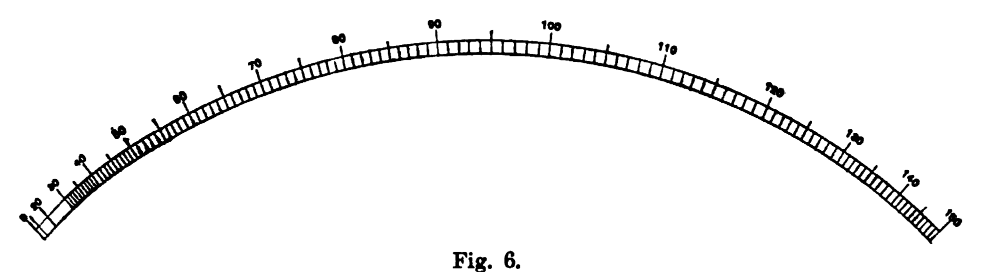


Fig. 6.

mit sogenannter proportionaler Skala eine Skalengenauigkeit von $\pm$ 0·1 eines Intervalles zu erreichen; während für die ungleichmäßig verlaufenden Skalen $\pm$ 0·2. eines Intervalles im günstigsten Teil der Skala als untere Grenze eben noch erreichbar sein dürfte.

Diese Genauigkeiten sind außerdem nur erreichbar, wenn die Eichung in einer solchen Lage des Instrumentes erfolgt, daß die Schwerkraft keinen merklichen Einfluß auf das bewegliche System ausüben kann, wenn also die Drehachse des beweglichen Systemes vertikal steht. Bei einer horizontalen Lagerung der Achse des beweglichen Systemes machen sich über kurz oder lang die Einwirkungen der Schwerkraft geltend. Eine geringe Verbiegung des Zeigers oder geringe Staubablagerungen auf demselben genügen, um erhebliche Skalenabweichungen hervorzubringen.

Fast vollständig ausgeschlossen ist die Möglichkeit eine gleiche Skalengenauigkeit für horizontale und vertikale Lage des beweglichen Systemes für ein und dasselbe Instrument zu erreichen, da dies die vollständige Unabhängigkeit desselben von der Einwirkung der Schwerkraft voraussetzt. Man erreicht diese Unabhängigkeit durch Anwendung einer Torsionsfeder (meist in Spiralform) als Gegenkraft, jedoch das Durchhängen dieser Feder in vertikaler Lage der Ebene derselben genügt bereits, um eine merkliche Störung der Ausbalancierung des Systems hervorzurufen. Noch störender wirkt unter Umständen die ungleichmäßige Wärmeausdehnung des Zeigerwerkes und des diesen ausgleichenden Gegengewichtes in Instrumenten mit sehr langen

Zeigern, wie sie für große Schalttafeln gelegentlich gebräuchlich sind. Bei unzweckmäßiger Wahl des Materials und der Form des Gegengewichtes für den Zeiger können grobe Fehler entstehen, die beim ersten Anschein den Charakter eines Temperaturkoeffizienten zeigen.

Durch die genaue Kenntnis der Skaleneigentümlichkeiten eines Instrumentes kann man jedoch noch keinen vollständigen Schluß auf die absolute Genauigkeit der Angaben desselben ziehen. Ein jedes Meßinstrument ist zufolge dem der Konstruktion zugrunde liegenden Prinzip einer Reihe von äußeren und inneren Beeinflussungen unterworfen, deren Kenntnis zur Beurteilung der Genauigkeit ganz besonders bei der Vergleichung verschiedener Instrumente unter sich von ausschlaggebender Wichtigkeit ist.

Die äußeren Beeinflussungen sind ihrer Natur nach unvermeidliche und meist nur unvollkommen ausgleichbar, so die Schwerkraft, äußere magnetische und elektrostatische Felder und Temperaturwechsel. Die Bewertung dieser Einflüsse hängt selbstverständlich von der absoluten Genauigkeit ab, welche für eine bestimmte Gattung von Instrumenten angegeben oder angenommen wird. In der Regel werden diese Beeinflussungen vom Gebraucher der Instrumente unterschätzt und dadurch vollständig vernachlässigt.

4. Einfluß der Schwerkraft.

Der Einfluß der Schwerkraft auf ein nicht vollkommen ausbalanciertes bewegliches System wurde bereits erwähnt. Für eine bestimmte Klasse von Instrumenten, bei denen die abstoßenden oder anziehenden elektrodynamischen oder elektrostatischen Wirkungen durch Veränderung von Gewichten bestimmt oder ausgeglichen werden, oder für welche der Meßbereich durch Auflegen von verschiedenen Gewichten bestimmt wird, kommt die Änderung der Schwerkraft auf der Erdoberfläche zur Geltung. Ein in Berlin geeichtes Instrument dieser Art würde in Meereshöhe am Äquator um 0·3 % falsch zeigen. Dieser Fehler würde sich bei einer Erhöhung von je 1500 m über den Meeresspiegel noch um 0·1 % vergrößern, so daß Abweichungen bis zu 0·5 % nicht ausgeschlossen sind. Außerdem können auch direkte Gewichtsveränderungen der bewegten Masse, wie sie im Laufe der Zeit und durch Zufälligkeiten im Gebrauch entstehen können, zu merklichen Fehlern Veranlassung geben.

Die Konstanz der Schwerkraft wird oft als Argument für die Konstanz der Angaben solcher Instrumente vorgebracht, welche dieselbe als Gegenkraft der elektrisch wirkenden Kräfte benutzen. Dieses Argument führt jedoch oft zur Vernächlässigung der notwendigsten Korrektionen, die, wie erwähnt, nicht unerheblich sein können.

5. Einfluß äußerer Magnetfelder.

Da in der Mehrzahl der technischen Meßinstrumente elektromagnetische und magnetische Wirkungen zur Messung benutzt werden, sind diese Instrumente mehr oder weniger äußeren magnetischen Beeinflussungen unterworfen. Abgesehen vom unvermeindlichen Erdmagnetfelde ist die Gefahr der Gegenwart sehr intensiver Magnetfelder in unserer Zeit der Stahl- und Eisenkonstruktionen ebenfalls eine fast allgegenwärtige. Diese Wirkungen werden um so merkbarer auftreten, je schwächer die in Wechselwirkung tretenden magnetischen Kräfte im Instrument selbst sind. Eine magnetische Schirmwirkung durch Umgeben des Instrumentensystemes mit Eisengehäusen gibt für die gewöhnlichen technischen Zwecke genügenden, jedoch nur teilweisen Schutz, welcher illusorisch wird, sobald die Eisengehäuse selbst magnetisch polarisiert werden. Auch auf die schützenden

Wirkungen astatischer Anordnungen darf man sich nicht allzusehr verlassen, da wegen der räumlichen Trennung der sich astasierenden Systeme eine solche Astasierung nur teilweiee erreicht wird.

Die äußeren magnetischen Beeinflussungen lassen sich bei elektrodynamometrischen Instrumenten leicht durch Richtungswechsel des Stromes, der durch das Instrument fließt, feststellen. Es genügt jedoch nicht, diesen Stromwechsel nur bei einem einzigen Ausschlag des Instrumentes vorzunehmen, sondern diese Prüfung muß bei den verschiedenen Skalenausschlägen wiederholt werden. Bei elektrodynamometrischen Instrumenten mit vertikaler Skalenanordnung, in welchen die Drehachse des beweglichen Systems horizontal gelagert ist, wird diese Prüfung besonders wichtig, da in den Breiten von Mittel-Europa die Vertikalintensität des Magnetfeldes wesentlich größer ist als die Horizontalintensität.

In gleicher Weise werden elektromagnetische Instrumente mit beweglichem System aus Weicheisen, wenn sie nicht durch ein eisernes Gehäuse magnetisch geschützt sind, stark beeinflußt. Wenn auch bei dieser Instrumentengattung der Anspruch auf Genauigkeit kein sehr großer ist, so sollte dennoch die Beeinflussung bereits durch das Magnetfeld der Erde nicht mehr vernachlässigt werden.

Bei den elektrodynamometrischen Instrumenten ist die Größe der Beeinflussung durch äußere magnetische Felder von dem Winkel abhängig, den die Kraftlinienrichtung des beeinflussenden Feldes mit der magnetischen Achse des beweglichen Systems bilden. Sind diese Richtungen genau parallel, so wird bei veränderter Stromrichtung die Stellung des beweglichen Systemes nicht verändert. Man kann daher diese äußere Beeinflussung für einen bestimmten Ausschlagwinkel der Drehspule dadurch beseitigen, daß man das Instrument in eine solche Lage bringt, in der die Kraftlinien beider Felder parallel verlaufen. Die Abwesenheit von Eisenmassen im Instrument vorausgesetzt, wird die Richtung der Kraftlinien durch äußere Felder nicht geändert. Wenn man die bewegliche Spule als eine Magnetnadel betrachtet, so sieht man, daß dieselben Beziehungen vorhanden sind wie bei einem Tangentengalvanometer. Es ist daher nicht angängig, die Korrektion des Einflusses äußerer Magnetfelder bei elektrodynamometrischen Instrumenten als prozentuale Korrektion durch eine einzige Messung der Abweichungen für einen Skalenausschlag zu bestimmen.

Anders verhält es sich bei den Instrumenten der Weston-Type, überhaupt bei allen den Instrumenten, welche größere Eisen- oder Stahlmassen enthalten. Für diese muß man sich den Vorgang der äußeren magnetischen Beeinflussung so vorstellen, daß die Kraftlinien des äußerlichen Feldes durch das Eisen oder den Stahl aufgenommen werden und daher ihre eigentliche Richtung verlieren und sich nur als Schwächung oder Stärkung des magnetischen Feldes des Instrumentes bemerkbar machen. Dieser Umstand bietet den großen Vorteil, daß man für derartige Instrumente, besonders für diejenigen mit Dauermagneten, wie die der Weston-Type, durch eine einzige Messung den prozentualen Betrag äußerer magnetischer Beeinflussungen bestimmen kann.

Folgende Versuche wurden angestellt, um die Einwirkungen äußerer magnetischer Felder auf das Magnetfeld eines Instrumentes der Weston-Type zu zeigen:

Ein Weston-Instrument mit sorgfältigst empirisch geeichter Skala wurde mit einem magnetischen Nebenschluß, d. h. mit einem durch Schrauben ein-

stellbaren Stück Eisen versehen, mit welchem man die Intensität des Magnetfeldes zwischen den Polen nach Belieben ändern konnte.

Der Versuch bestand darin, daß das Instrument vermittels dieses magnetischen Nebenschlusses nach dem Sollwert des Eichnormales auf den Teilstrich 100 genau eingestellt wurde. Die Vergleichung der Skala mit dem Normal ergab die abgelesenen Werte der Kolonne 1.

Normal	1 Ohne äußere magnetische Störung	2	3	4
10	10·0	10·0	10·0	10·0
20	20·0	20·0	20·0	20·0
30	30·0	30·0	30·0	30·0
40	40·0 —	40.0	40·0 —	40·0 —
50	50·0	50·0	50·0	50·0
60	60·0	60·0 +	60·0 +	60·0 +
70	70·0 —	70·0	70·0	70·0
80	80·0 —	80·0	80·0	80·0
90	90·0	90·0	90·0	90·0
100	**100·0**	**100·0**	**100·0**	**100·0**
110	110·0	110·0	110·0	110·0
120	120·0 —	120·0	120·0 —	120·0 —
130	130·0	130·0	129·95	130·0
140	140·0	140·0	139·95	140·0
150	150·0	150·0	149·95	150.0

Ein kräftiger Hufeisenmagnet wurde mit den Polen ca. 12 cm unter die Pole des Instrumentenmagneten gelegt, so daß die Kraftlinienrichtung des störenden Feldes in der Richtung von einem Pol zum anderen des Instrumentenmagneten verlief (Fig. 7 a). Die Ablesung des Instrumentes wurde dadurch auf 99·0 verringert. Darauf wurde das Instrument vermittels des magnetischen Nebenschlusses wiederum auf Teilstrich 100·0 eingestellt und die Prüfung der Skala wiederholt.

Es ergaben sich alsdann die Ablesungen der Kolonne 2, die keinen merklichen Unterschied von der ursprünglichen Eichung des Instrumentes zeigen. Dieselben Manipulationen wurden für die Lagen 3 (Fig. 7 b) und 4 (Fig. 7 c) vorgenommen. Die unkorrigierte Ablesung der Lage 3 betrug 101·0.

Die Zahlen der Kolonne 3 zeigen eine ganz geringe Abweichung in dem oberen Teil der Skala, nachdem das Instrument auf den Skalenteil 100 eingestellt war.

Für Lage 4 betrug die unkorrigierte Ablesung 100·9. Die auf 100 eingestellte Skala zeigt keine merklichen Abweichungen. Die Bezeichnung + und — in der Tabelle hinter einigen der Ablesungen soll andeuten, daß die Abweichung weniger als 0·05 eines Intervalles positiv oder negativ war.

Aus diesen Resultaten geht zur Genüge hervor, daß die durch äußere magnetische Felder entstehenden Störungen selbst unter sehr ungünstigen Verhältnissen durch eine einzige Ablesung als proportionale Fehler bestimmt werden können. Das Magnetfeld wird durch diese äußeren Einwirkungen

nur gestärkt oder geschwächt, erfährt aber keine wesentliche Direktionsänderung. Bringt man ein Weston-Instrument in verschiedene Lagen im magneteschen Erdfeld, so werden die dadurch in den verschiedenen Lagen

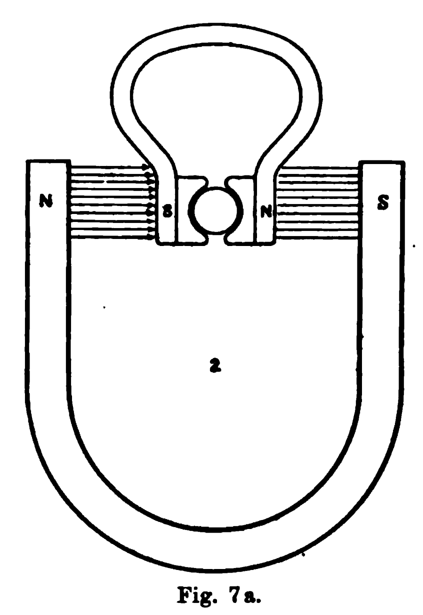


Fig. 7a.

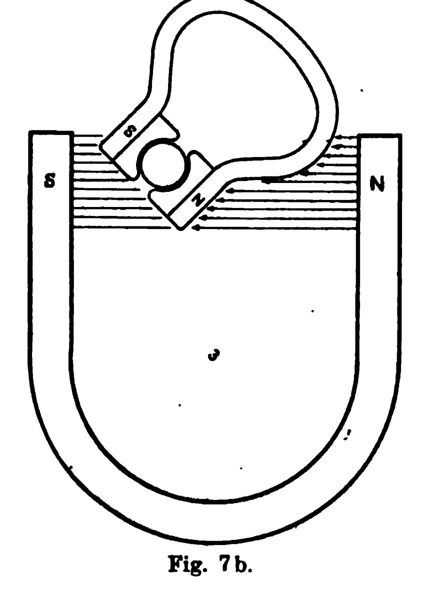


Fig. 7b.

entstehenden kleinen Abweichungen nur prozentuale Verschiedenheiten ergeben; der Skalencharakter bleibt bei gleichmäßigen störenden Feldern jedenfalls gewahrt, im Gegensatz zu der Einwirkung auf elektrodynamische und elektromagnetische Instrumente, in welchen die Richtung des störenden Magnetfeldes auf die Größe der Abweichung von wesentlichem Einfluß ist, wie dies bereits oben erwähnt wurde.

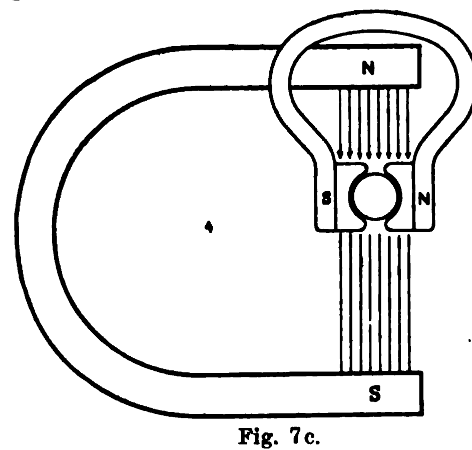


Fig. 7c.

6. Einfluß von Temperaturwechsel.

Seit der epochemachenden Entdeckung Dr. WESTONS (U. S. Patent 1886 Nr. 381 304 u. 381 305) von Legierungen mit verschwindend kleinem, oder sogar gering negativem Temperaturkoeffizienten (vgl. Hdb. I, 2 Seite 252) bietet die Vermeidung von Fehlern, welche durch Temperaturbeeinflussung der in den Meßinstrumenten zur Verwendung kommenden Widerstände entstehen konnten keine besonderen Schwierigkeiten mehr. Der außerordentliche Wert gleicher und ähnlicher Legierungen für die elektrische Meßtechnik ist durch die eingehenden Untersuchungen der Professoren FEUSSNER, LINDECK und JÄGER der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt zweifellos erwiesen worden, und ihre Verwendung ist heutigen Tages eine ganz allgemeine.

Obgleich in den erwähnten WESTONschen Patenten bereits die Tatsache festgelegt wurde, daß es möglich ist, Legierungen mit negativen Temperaturkoeffizienten herzustellen, so ist bis jetzt noch keine Legierung bekannt ge-

worden, deren negativer Temperaturkoeffizient von genügender Größe wäre, so daß man eine vollständige Kompensation in den Fällen erreichen kann, in welchen man beträchtliche positive Koeffizienten mit einem hohen negativen Temperaturkoeffizienten vollständig kompensieren könnte.

Für den Ausgleich der Temperaturfehler eines Meßinstrumentes ist jedoch keineswegs die Temperaturabhängigkeit der Widerstände allein maßgebend. Es ändert sich z. B. die Torsionskraft der Spiralfedern, welche fast ausschließlich in Instrumenten mit Drehspule zur Verwendung kommen; selbst die Veränderung der gegenseitigen Lage wichtiger Teile des Instrumentensystemes durch Ausdehnung und Zusammenziehung ist von nachweisbarem Einfluß. In Instrumenten, welche einen Dauermagneten besitzen, würde die Veränderung des magnetischen Momentes mit der Temperatur, wenn auch sehr gering, so doch nachweisbar zur Geltung kommen.

In Fig. 1, Kurve II und III wurde gezeigt, wie durch geringes Anziehen der das System zusammenhaltenden Schrauben eine vollständige Veränderung des Charakters der Skala entsteht. Bei Skalenpunkt 100 beträgt die Abweichung etwa 1·2 %. Analog läßt sich der Einfluß der Ausdehnung und Zusammenziehung wichtiger Teile des Instrumentensystemes durch Temperaturwechsel erklären.

Die Torsionskraft der Spiralfedern nimmt mit zunehmender Temperatur etwas ab, daher werden Instrumente mit solchen Federn bei erhöhter Temperatur empfindlicher.

Alle diese verschiedenen Beeinflussungen sind nur sehr schwer voneinander zu trennen, und man wird daher das Instrumentensystem auf die Gesamtheit dieser Beeinflussungen untersuchen. Bei der eingehenden Besprechung der verschiedenen Instrumente soll die Beeinflussung des Instrumentensystemes selbst mit „Instrumentenkoeffizienten“ bezeichnet werden.

Ausgedehnte Untersuchungen darüber, welche Anfang der 1890 er Jahre im Laboratorium der Weston-Gesellschaft gemacht worden sind, konnten für die elektrodynamometrischen Instrumente und diejenigen der Weston-Type bestimmte Regeln nicht bestätigen.

Wird für solche Instrumente die höchste Genauigkeit erfordert, so muß die Bestimmung dieses Koeffizienten für jedes Instrument gemacht werden. Allgemein ist festgestellt, daß der Instrumentenkoeffizient, sofern ein solcher überhaupt vorhanden, stetig in dem Sinne wirkt, daß das Instrument bei erhöhter Temperatur empfindlicher wird. Danach richtet sich schließlich die Kompensation dieser Beeinflussungen.

Die beobachteten Maximalwerte betragen für die Weston-Instrumente mit Dauermagneten 0·03 %, für die elektrodynamometrischen gelegentlich bis zu 0·05 % pro Grad Celsius. Durch besondere Wahl des Widerstandsmaterials werden jedoch diese Beeinflussungen für die Präzisionsinstrumente der erwähnte Type kompensiert.

7\. Elektrostatische Beeinflussungen

Die Beeinflussungen elektrostatischer Instrumente durch statische Ladungen der umgebenden Gegenstände kann mit einiger Vorsicht vermieden werden, indem man das Instrumentensystem mit einem möglichst geschlossenen, metallischen Gehäuse umgibt. Fast wichtiger und doch oft unbeachtet sind die elektrostatischen Beeinflussungen eines jeden beweglichen Instrumentensystems, welche durch Abwischen des die Öffnung für die Skala bedeckenden Glases oder durch Abreiben von Hartgummiteilen entstehen, die sich in der Nähe des beweglichen Systemes befinden. Die Abhilfe ist eine einfache,

indem man nach dem Reinigen eines Apparates über das Schauglas haucht und beobachtet ob dadurch die Zeigerstellung unverändert bleibt. Die durch den Hauch sich niederschlagende Feuchtigkeit genügt, um diese Störungen zu beseitigen. Von Professor AYRTON wurde ein durchsichtiger Firnis angegeben, welcher dazu dienen sollte, die Schaugläser zu überziehen und deren Oberfläche genügend leitend zu machen, so daß elektrostatische Ladungen auf denselben nicht festgehalten wurden. Die Verwendung dieses Firnisses scheint sich jedoch nicht weiter eingeführt zu haben.

Zu beachten sind ferner die elektrostatischen Influenzerscheinungen, welche bereits bei Spannungen von 500 Volt und darüber sich bemerkbar machen, wenn das bewegliche System besonders gut von den Metallteilen des Gehäuses isoliert ist. Die am System liegende Spannung erzeugt in demselben eine elektrostatische Ladung, welche induktiv besonders auf die unter dem Zeiger des Systems liegenden Metallmassen z. B. das Skalenblech, einwirkt. Es entsteht dadurch ein Festhalten des Zeigers, so daß sich derselbe indifferent einstellt. Die Abhilfe ist Sache des Fabrikanten und besteht darin, daß man die betreffenden Metallmassen mit dem System leitend verbindet. Besonders störend in dieser Weise kann der an Schalttafelinstrumenten öfter angebrachte Einstellzeiger wirken. Dieser ist von außerhalb des Gehäuses zugänglich und dient dazu, eine bestimmte Spannung zu markieren, auf welche bei der Regulierung gehalten werden soll. Bei Spannungen von etwa 500 Volt und darüber kann man diese elektrostatische Induktionswirkung beobachten, indem man den Einstellzeiger langsam am Instrumentenzeiger vorüber bewegt. Besonders bei langem Zeigerwerk bemerkt man alsdann, daß der Zeiger auf kurze Entfernung dem sich vorüber bewegenden Index folgt. Daraus kann man schließen, daß der Zeiger des Systemes innerhalb bestimmter Spannungsänderungen, welche mehrere Volt betragen können, festgehalten wird. Die Vermeidung dieses Übelstandes wird dadurch erschwert, daß das Instrumentensystem von dem Gehäuse und dem Einstellzeiger als Teil des Gehäuses isoliert sein soll.

Besondere Beachtung erfordern die elektrostatischen Einwirkungen auf das bewegliche System der elektrodynamometrischen Leistungsmesser, wenn dieselben mit voneinander getrennten Strom- und Spannungsquellen gebraucht werden (besonders auch bei Benutzung von Transformatoren zu beachten). Diese elektrostatische Einwirkung wird vermieden, wenn man prinzipiell einen Pol des Spannungskreises mit einem Pol des Starkstromkreises metallisch verbindet.

8. Mechanische Beeinflussungen.

Die moderne Meßtechnik beschränkt sich mit ganz geringen und erzwungenen Ausnahmen auf die Verwendung von Instrumenten, in welchen die beweglichen Teile mit fein polierten Stahlspitzen versehen sind, die ihr Lager in ebenfalls polierten Pfannen von sogenannten Halbedelsteinen finden.

Im Vorübergehen mag die Verwendung von Iridiumspitzen erwähnt werden, welche in einigen der früheren Instrumente von Lord KELVIN zur Verwendung kamen. Der Vorteil der Nichtoxydierbarkeit dieses Materials scheint jedoch durch die ungünstige Bearbeitungsfähigkeit desselben aufgehoben zu werden.

Solange man sich anfangs mit geringer Genauigkeit der Schalttafelinstrumente begnügte und wenig Wert auf kleinen Energieverbrauch derselben legte, benutzte man als Lager polierte Stahlpfannen, im günstigsten Falle nach Analogie der Markscheider und Schiffskompasse polierte Achat- oder Granatlagersteine.

Die Stahlspitzen besaßen in der Regel die Form einer Nähnadelspitze und waren verhältnismäßig lang und dünn. Diese dünnen Spitzen wurden außerdem, besonders in einigen der ersten Weicheiseninstrumente, durch ganz unglaubliche Gewichte beansprucht.

Die Unzuverlässigkeit dieser Lagerung beeinträchtigte die Widerstandsfähigkeit derartiger Instrumente besonders für ambulante Zwecke in dem Maße, daß man zur Erreichung größerer Genauigkeit an der vom Torsionsgalvanometer und Torsionsdynamometer, vom Siphon-Rekorder und Deprez-d'Arsonval-Galvanometer her bekannten Faden- oder Draht-Suspension festhielt. Auch die ersten Westonschen direkt zeigenden Drehspuleninstrumente zeigen diese Aufhängung an einem Metallfaden.

Eine erhebliche Verbesserung in dieser Hinsicht zeigen bereits die ersten Westonschen Zeigerinstrumente mit Spitzenlagerung, indem die aus glashartem Stahl angefertigte Spitze eine gedrungene Kegelform mit einem Winkel von 60° an der Spitze besaß und zu Lagersteinen der harte und sehr polierfähige Saphir benutzt wurde.

Die dauernde Gebrauchsfähigkeit eines Instrumentes mit Spitzenlagerung steht und fällt mit der sorgfältigen Ausführung und Wahl des Materials dieser Lagerung. Die durch schlechte oder beschädigte Lagerung bedingten Störungen machen sich durch indifferente Einstellung des Zeigers, besonders in der Nullage und den Anfangsteilen der Skala bemerkbar.

Trotz sorgfältigster Ausführung der Lagerung muß eine gewisse Hemmung des beweglichen Systemes durch Reibung in den Lagern angenommen werden, und es ist Sache der Erfahrung des Fabrikanten, die Wahl des Drehmomentes des beweglichen Systemes und besonders des Verhältnisses dessen Gewichtes zum Drehmoment so zu treffen, daß die vorhandene Hemmung nicht störend auftritt und innerhalb der Ablesefähigkeit des Instrumentes bleibt. Dieses Verhältnis des Drehmomentes zum Gewicht des beweglichen Systemes ist nur von ganz wenig Konstrukteuren in seiner ganzen Tragweite beachtet worden. Die Nichtbeachtung hat zur Folge, daß die Instrumente keine Widerstandsfähigkeit im Gebrauch zeigen.

Als ein noch ausreichender Wert dieses Verhältnisses hat sich durch die Praxis für in Spitzen und harten Steinen gelagerte Systeme Folgendes ergeben:

Drückt man das Drehmoment für einen Skalenausschlag von 90° durch ein Gewicht in Gramm aus, welches, in der Entfernung von 1 cm von der Drehachse aufgehängt gedacht, und dem Drehmoment Gleichgewicht hält, so soll dieses Gewicht nicht weniger als $^1/_{20}$ des Gewichtes des ganzen beweglichen Systemes betragen. Geht man unter dieses Verhältnis, so riskiert man die Widerstandsfähigkeit des Instrumentes gegen mechanische Beschädigungen mit einer daraus folgenden Unsicherheit der Einstellung.

Nimmt man z. B. das Gewicht eines Drehspulensystemes zu 2 Gramm an, ein Wert der bei zweckmäßiger Konstruktion leicht erreicht werden kann, so sollte die Torsion der Federn für vollen Skalenausschlag durch ein Gewicht von mindestens 0·1 g an einem Hebelarm von 1 cm ausgeglichen werden. Dies gilt für eine vertikale Lagerung der Achse des Systems; bei der horizontalen Lagerung werden beide Spitzen in den Lagern beansprucht, so daß man für derartige Instrumente entsprechend größere Torsionskräfte vorsehen muß.

9. Elastische Nachwirkung der Federn.

Wird die Torsionskraft einer Feder als Gegenkraft zur Messung einer elektromagnetischen Wirkung benutzt, so hängt die Verläßlichkeit der Messung wesentlich von den Eigenschaften einer solchen Feder ab. — Eine genau gehende Taschenuhr bringt einen täglichen Beweis dafür, in welch hohem Grade man sich auf die Konstanz der Torsionskraft einer guten Spiralfeder verlassen kann. Die Unruhfeder einer Taschenuhr wird täglich mehrere hunderttausend Mal auf eine Torsion beansprucht, die dem Skalenausschlag von 90° eines Meßinstrumentes entspricht. Wenn aus diesem Vergleich hervorgeht, daß die Torsionsarbeit, welche die Feder eines Meßinstrumentes zu leisten hat, eine verhältnismäßig geringe ist, so muß auf der anderen Seite in Betracht gezogen werden, daß die Federn des Instrumentes bei langdauerndem Ausschlag stets nur in einer Richtung auf Torsion in Anspruch genommen werden. Außerdem steht für das elektrische Meßinstrument in der Regel nicht das einwandfreie Stahlmaterial der Unruhfeder zur Verfügung, sondern es muß nichtmagnetisches Material zur Verwendung kommen. Sofern die Federn als Stromleitung benutzt werden, wirkt unzweifelhaft der durch dieselben führende Strom ungünstig auf die molekulare Struktur der Feder ein und unter Umständen wird selbst eine geringe Stromwärme, die in den Federn erzeugt wird, nicht ohne Einfluß bleiben. Die Herstellung guter Federn aus nichtmagnetischem Material ist mit großen Schwierigkeiten verbunden, zumal wenn die Federn zugleich als stromführende Leiter dienen sollen und außerdem einen niedrigen Ohmschen Widerstand besitzen müssen.

Um die Torsionsfedern auf ihre elastische Qualität prüfen zu können, verfährt man in einfachster Weise derart, daß man ein mit den zu prüfenden Federn versehenes Instrument längere Zeit mit vollem Skalenausschlag eingeschaltet läßt und nach der Unterbrechung des den Ausschlag hervorrufenden Stromes beobachtet, ob der Zeiger des Instruments sofort auf den Nullpunkt der Skala zurückkehrt. Ist dies nicht der Fall, sondern beobachtet man eine mehr oder weniger große positive Abweichung von der anfänglichen Nullstellung des Zeigers, so besitzt die Feder elastische Nachwirkung. Man beobachtet alsdann die Zeit, innerhalb welcher der Zeiger von selbst auf seine anfängliche Nullage zurückkehrt. Geschieht dies schnell, so sind die Federn allenfalls verwendbar. Nimmt dies jedoch eine längere Zeit in Anspruch, so sind derartige Federn für genaue Messungen zu verwerfen.

Der durch diese elastische Nachwirkung entstehende Fehler läßt sich nämlich weder als konstante Größe, noch prozentual bestimmen, wie die in der Tabelle angegebenen Versuche dartun. Ein mit mittelmäßigen Federn versehenes Instrument wird auf seine Skalengenauigkeit von 10 zu 10 Intervallen geprüft, (Kolonne I). Nach dieser Prüfung wird der Zeiger des Instrumentes auf den Endpunkt der Skala eingestellt und bleibt dort eine Stunde (Kolonne II), darauf 10 weitere Stunden in dieser Stellung (Kolonne III). Nach einstündiger Einschaltung beobachtet man die Abweichung + 0·2 eines Skalenteiles von der anfänglichen Nullstellung, nach weiterer 10 stündiger Einstellung eine Abweichung von + 0·4, die in 5 Minuten auf + 0·2 herunter geht, während der Ausschlag für Teilstrich 100 in allen Fällen mit demselben Strom erhalten wird.

Die in Kolonne II und III angegebenen Ablesungen sind sofort nach Ausschaltung des Instrumentes ohne Korrektion der Nulleinstellung aufgenommen. Es zeigt sich dabei die eigenartige Erscheinung, daß die Skalen-

werte für die obere Hälfte der Skala keine merklichen Abweichungen ergeben, während nach dem Nullpunkt zu die Abweichungen stetig zunehmen.

Die in Kolonne IIa und IIIa aufgeführten Werte wurden erhalten, nachdem der Zeiger durch eine Nulleinstellungsvorrichtung auf den Nullpunkt zurückgebracht wurde. Die Skala zeigt dabei ihren ursprünglichen Charakter.

Aus diesen Resultaten möchte zur Genüge hervorgehen, daß durch elastische Nachwirkung Abweichungen hervorgerufen werden, die sich einer genauen Beurteilung mehr oder weniger entziehen, so daß man Instrumente, die mit sogenannten weichen Federn versehen sind, von der Bezeichnung „Präzisionsinstrumente“ unbedingt ausschließen muß.

Tabelle 1.

Prüfung der Federn auf elastische Nachwirkung.

Sollwert	I Erste Ablesung	II nach 1 Stunde auf Teilstrich 100	IIa Nullpunkt korrigiert	III nach 10 Stunden auf Teilstrich 100	IIIa Nullpunkt korrigiert
0	0·0	0·2	0·0	0·4	0·0
10	10·0	10·2	10·0	10·3	10·0
20	20·0	20·2	20·0	20·2	20·0
30	30·0	30·1	30·0	30·1	30·0
40	40·0	40·1	40·0	40·1	40·0
50	50·0	50·0	50·0	50·0	50·0
60	60·0	60·0	60·0	60·0	60·0
70	69·9	69·9	70·0	69·9	69·9
80	79·9	79·9	79·9	79·9	79·9
90	89·9	89·9	89·9	89·9	89·9
100	100·0	100·0	100·0	100·0	100·0

10. Dämpfung. Für das dauernde, einwandsfreie Funktionieren eines beweglichen Systems ist die Dämpfung desselben von großer Wichtigkeit, da diese einen wirksamen Schutz gegen Abnutzung und Beschädigung der Lagerung desselben bildet. So ist die vorzügliche Dämpfung der Weston-Instrumente ein Hauptgrund der Abschaffung einer Arretierung des Drehspulensystemes gewesen. Eine aperiodische Dämpfung verhindert das dauernde Pendeln des Systemes auf dem Transport und dadurch eine zu schnelle Abnutzung der Spitzenlagerung.

Die praktische Meßtechnik verlangt ein gut gedämpftes Instrument, d. h. ein solches, dessen bewegliches System sich nicht nur ohne Nachschwingungen einstellt, sondern das bei einem kräftigen Ablenkungsimpuls nur wenig über seine Endeinstellung hinausschwingt. Bei großem Trägheitsmoment des beweglichen Systems und bei Verwendung schwacher kontrollierender Kräfte desselben resultiert gewöhnlich ein „Kriechen“. Das bewegliche System besitzt dann sehr leicht ungenügende lebendige Kraft, um die vorhandene Spitzenreibung in den Lagern zu überwinden und die Folge davon ist eine unsichere Einstellung des Zeigers.

Die in modernen technischen Meßinstrumenten zur Verwendung kommenden Dämpfungsarten sind:

a) Wirbelstromdämpfung,

b) Luftdämpfung,

c) Flüssigkeitsdämpfung.

Ein schwingender Magnet erzeugt in einer denselben umgebenden Metallmasse Dämpfungsströme (Fig. 8). Da schwingende Magnete zu quantitativen

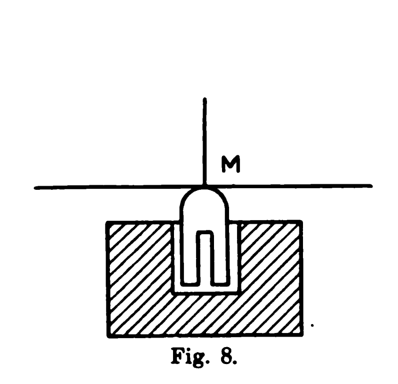


Fig. 8.

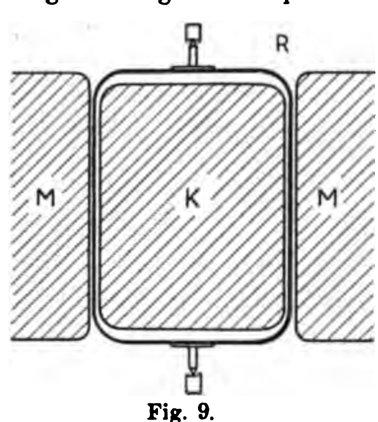


Fig. 9.

Messungen kaum noch Verwendung finden, ist diese Art der Dämpfung nur noch für Galvanometer von Belang.

a) Wirbelstromdämpfung.

Bewegt sich in einem Magnetfeld ein elektrischer Leiter, so daß er die Kraftlinien des Feldes durchschneidet, so entstehen Wirbelströme in diesem Leiter, welche der Bewegung desselben einen Widerstand entgegensetzen, die Bewegung des Leiters wird mehr oder weniger gedämpft. Die bekannteste Art dieser Dämpfung ist diejenige der WESTON-Instrumente (Fig. 9).

Der stromführende Leiter des beweglichen Systems ist auf ein Metallrähmchen gewickelt. Die Wirbelströme werden besonders kräftig in der zusammenhängenden Metallmasse des Rähmchens erzeugt. Durch Wahl des spezifischen Widerstandes dieser Metallmasse kann man die Dämpfung in weiten Grenzen ändern. Die Dämpfung im stromführenden Leiter selbst kommt nur zur Geltung, wenn dieser und der äußere Schließungskreis desselben geringen OHMschen Widerstand besitzt.

Eine zweite Art der Wirbelstromdämpfung besteht darin, daß eine Metallscheibe oder ein Metallzylinder zwischen den Polen von besonders zu Dämpfungszwecken angebrachten Magneten schwingt (Fig. 10). Diese Dämpfung wird mit Vorliebe in denjenigen Instrumentensystemen angewandt, welche von äußeren magnetischen Feldern nicht beeinflußt werden, so z. B. in Hitzdraht- und elektrostatischen Instrumenten.

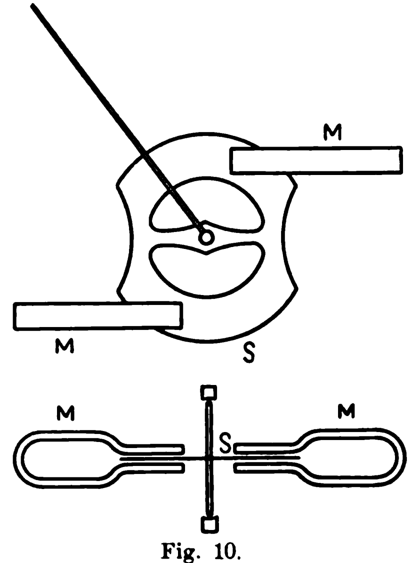


Fig. 10.



Dr. Benischke benutzt dieselbe auch in elektrodynamischen Instrumenten, indem er das gegen äußere magnetischeFelder sehr empfindliche elektrodynamische System mit einem besonderen Eisenschutz umgibt. Auch in den Instrumenten, welche auf Induktionswirkung basiert sind, wird diese Dämpfung öfters verwendet. Die Benutzung von Dauermagneten zu Dämpfungszwecken in Wechselstrominstrumenten hat den Nachteil, daß diese Magnete durch die Einwirkung eines Wechselstromfeldes leicht geschwächt werden und dadurch ihre Dämpfungswirkung verlieren.

b) Luftdämpfung.

Als Prototyp dieser Dämpfungsart ist die Töplersche Luftdämpfung zu erwähnen. Möglichst leicht gehaltene Flügel (F) aus Aluminium oder Glimmer (Fig. 11) schwingen in einer dieselbe allseitig und eng umgebenden Luft-

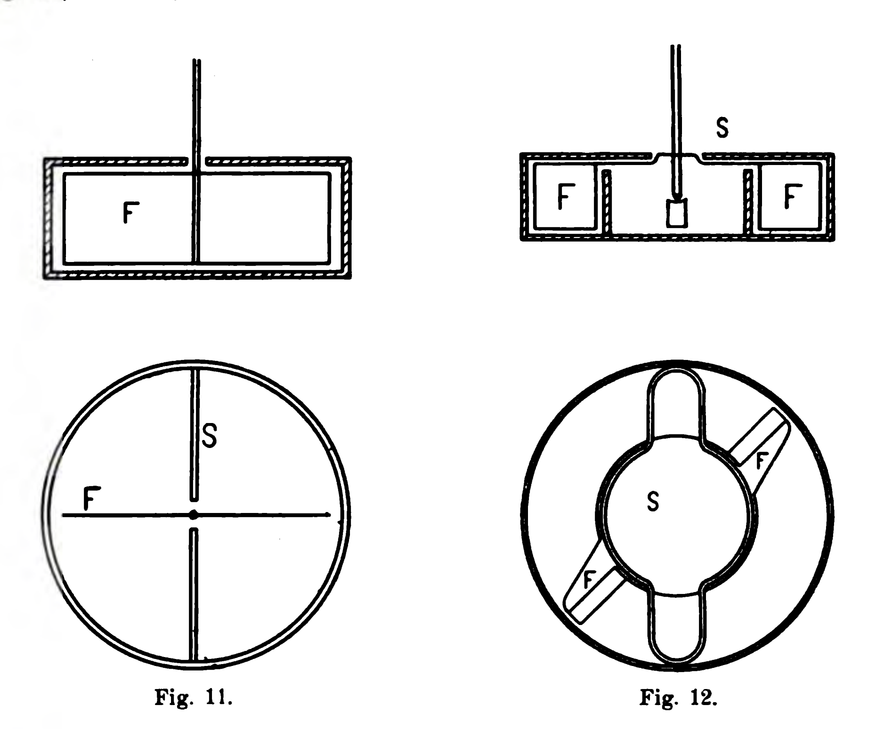


Fig. 11. Fig. 12.

kammer. Der durch die Bewegung der Flügel erzeugte Gegendruck der eingeschlossenen Luft wirkt dämpfend auf die Schwingungen des beweglichen Systemes. Die Dämpfung wird durch Anbringung von Trennungswänden (S) in der Kammer noch erhöht.

Eine wirkungsvolle Dämpfung dieser Art ist die von A. O. Benecke angegebene, DRP. Nr. 146188 18. Okt. 1892. Eine aus dünnem Aluminiumblech gestanzte und gepreßte Scheibe S (Fig. 12) trägt in einiger Entfernung vom Mittelpunkt 2 Flügel F. Die Scheibe selbst reicht in ihrem kleineren Kreisumfang durch einen Schlitz O der Luftkammerwände in diese noch hinein und füllt auf diese Weise den Schlitz genügend aus, so daß ein Entweichen der durch die Bewegung der Flügel zusammengepreßten Luft durch diesen Schlitz erschwert wird.

Die erwähnten Anordnungen haben den Vorteil der symmetrischen Verteilung der Gewichte und der dämpfenden Kräfte um die Achse des beweglichen Systemes und erhöhen das Moment desselben nur gering. In der

BENECKEschen Dämpfung ist der Dämpfungsflügel trotz seines geringen Gewichtes (0·4 Gramm) sehr stabil.

Eine unsymmetrische Anordnung der Luftdämpfung zeigt Fig. 13 (WILLYOUNG USA.-Patent Nr. 491457, SIEMENS & HALSKE DRP. Nr. 82199.

An einem entsprechend gebogenen Arm *R*, welcher der Stabilität halber gewöhnlich aus Metallrohr besteht, ist der mit aufgebogenen Rändern versehene Dämpferflügel *F* befestigt. Dieser Flügel schwingt mit geringem Spielraum in einer zylindrischen Kammer. Durch diese Anordnung kann eine sehr wirkungsvolle Dämpfung erreicht werden, jedoch wird durch die Unsymmetrie das bewegliche System durch die ausbalancierenden Gegengewichte unnötig beschwert, auch treten leicht Störungen durch Verbiegung des langen Armes desselben ein und kleine Lagenveränderungen der Achse werden durch die Länge des Hebelarmes, an welchem sich der Dämpferflügel befindet, stark vervielfältigt. Aus diesem Grunde muß man bei dieser Anordnung mit großem Luftzwischenraume zwischen dem Dämpferflügel und den Wänden der Dämpferkammer rechnen, wodurch wiederum die Wirksamkeit der Dämpfung beeinträchtigt wird. Außerdem ist bei dieser Anordnung noch besonders darauf zu achten, daß zwischen dem Dämpferkolben und den Wänden der Kammer keine statischen Spannungsdifferenzen auftreten können, da alsdann diese Dämpfung wie ein Elektrometer arbeiten würde.

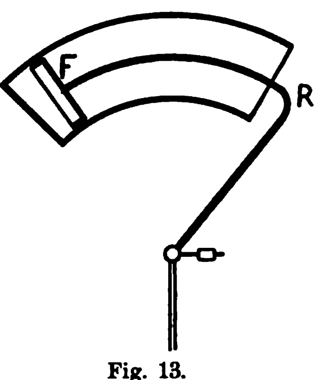


Fig. 13.

Verschiedene Modifikationen von Luftdämpfungen sind in Fig. 14—16 skizziert. Keine derselben erreicht mit gleichen Oberflächen der Dämpferflügel die Wirksamkeit der BENECKEschen Dämpfung. Fig. 14 führt die Kammer bis zur Achse, um einen möglichst kleinen Luftspalt für die entweichende Luft zu erhalten.

In Fig. 15 ist die Öffnung der Kammer durch einen zylindrischen Körper aus Aluminium so weit als möglich abgeschlossen (ARCIONI).

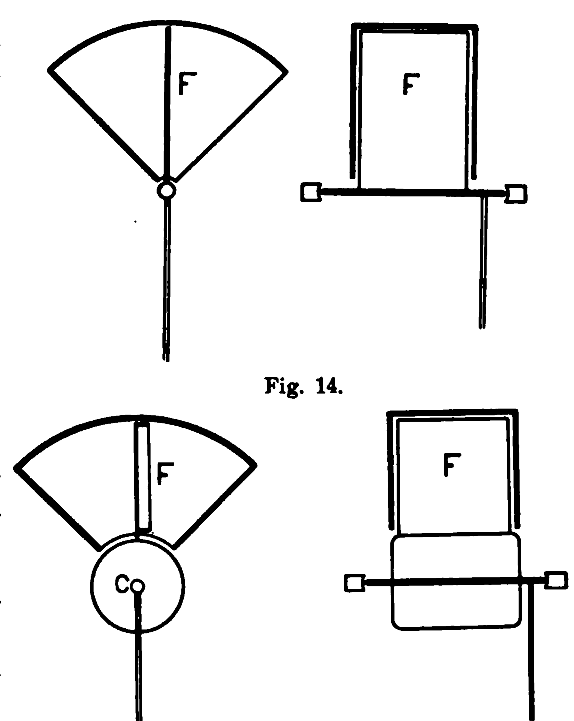


Fig. 14.

Fig. 15.

In Fig. 16 verbleibt ein offener Schlitz über die ganze Länge der Dämpferkammer, durch welchen die zusammengepreßte Luft leicht entweichen kann, so daß dadurch die dämpfende Wirkung etwas beeinträchtigt wird.

c) Flüssigkeitsdämpfung.

Die einfachste Ausführung dieser Art Dämpfung findet man in den Elektrometern älterer Konstruktion (MASKART), sowie in dem elektrostatischen Multizellularvoltmeter von KELVIN. Eine mit dem Instrumentensystem fest verbundene Aluminiumscheibe S (Fig. 17) dreht sich in einer etwas viskosen Flüssigkeit. Für energische Dämpfungswirkung ersetzt man die Scheibe

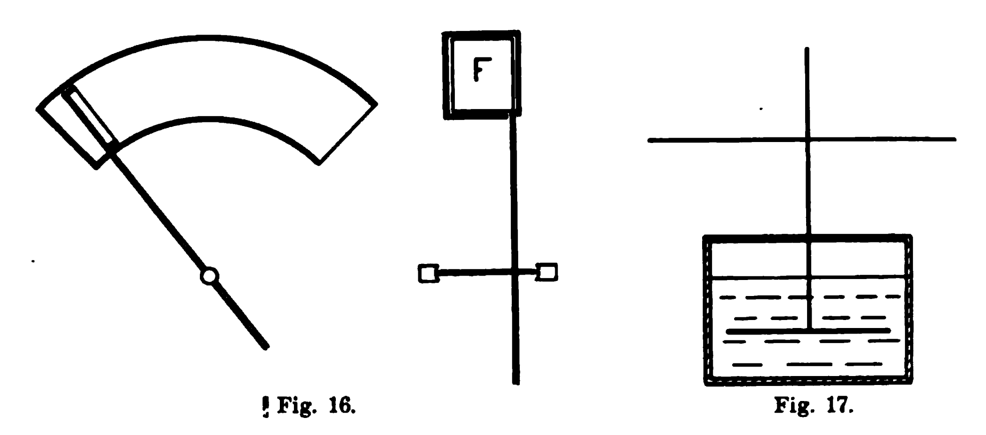


Fig. 16. Fig. 17.

durch Flügel (Fig. 18), welche vollständig in die Flüssigkeit eintauchen müssen, da sonst die Oberflächenspannung der Flüssigkeit störend wirkt und ein Kriechen des Systems verursacht. Diese Dämpfung bedingt ein mehr oder weniger offenes Ölgefäß und ist daher für tragbare technische Instrumente zum mindesten unbequem. Um das offene Ölgefäß zu vermeiden, be-

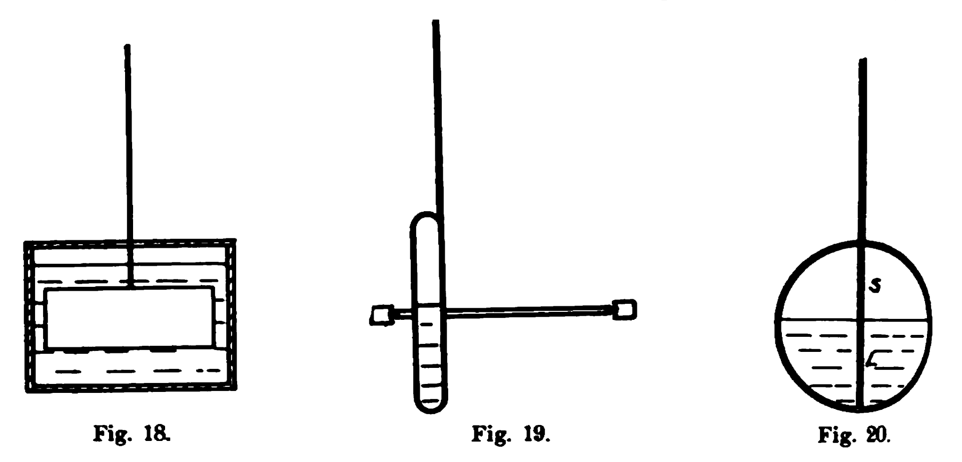


Fig. 18. Fig. 19. Fig. 20.

nutzte HOLDEN eine teilweise mit Glyzerin gefüllte, hermetisch verschlossene Kapsel (Fig. 19), welche mit dem beweglichen System schwingt. Bei dem Schwingen des Systems dreht sich die an der Drehachse befestigte Kapsel mit, und das Flüssigkeitsniveau eilt der Drehung nach. Die Trägheit, mit der die Flüssigkeit der Erdschwere nachkommt und sich auf ein neues Niveau einstellt, bildet das dämpfende Moment. Zur Erhöhung der Dämpfung ist in einer anderen Konstruktion im Inneren der Kapsel noch eine mit einem Loch versehene Scheidewand angebracht (Fig. 20). Das Nacheilen der Niveaueinstellung wird dadurch erschwert und die so verursachte Dämpfung vergrößert. Diese letzteren Dämpfungsarten haben den großen Nachteil, daß

sie das bewegliche System beträchtlich beschweren und daß die an den Wänden der Kapsel haftende Flüssigkeit, die nur langsam abfließt, ein ungenaues Einstellen und ein Kriechen des beweglichen Systems verursacht.

Von nicht zu unterschätzender Wichtigkeit für das dauernd einwandsfreie Funktionieren eines guten Meßinstrumentes ist der staubdichte Abschluß des Inneren durch zweckmäßig konstruierte Gehäuse. So selbstverständlich wie diese Bedingung erscheint, so häufig wird gegen dieselbe von den Konstrukteuren gefehlt. Es gehört mit zu den schwierigsten Aufgaben der Fakrikation von feinen Meßinstrumenten, eine absolute Sauberkeit bei der Montage derselben zu erreichen. Alle Bemühungen in dieser Richtung werden vereitelt, wenn die Instrumente von nicht sachkundiger Hand geöffnet und sorglos wieder verschlossen werden. Nicht zum geringen Teil als Schutz gegen unberufene Eingriffe hat sich die Gepflogenheit gebildet, die Instrumentengehäuse mit Siegeln oder Plomben zu sichern. Ein derartiger Verschluß sollte von dem Benutzer unter allen Umständen respektiert werden, denn er gibt dem Fabrikanten die beste Kontrolle für sein Personal und setzt ihn in den Stand, die Zweckmäßigkeit seiner Konstruktion zu prüfen und wichtige Erfahrungen für Verbesserung zu sammeln.

11. Skaleneinteilung und Bezifferung.

Die bereits besprochene Notwendigkeit der empirischen Herstellung der Skalen für die technischen elektrischen Meßinstrumente gewährt die Möglichkeit, ohne besondere Verteuerung der Herstellung die Wahl der Skaleneinteilung in weiten Grenzen beliebig und zweckentsprechend zu treffen. Im Laufe der Zeit haben sich betreffs dieser Einteilung bestimmte Normen ausgebildet.

Für Gleichstrombetrieb hat man sich fast international auf die Normalspannungen 110, 220 oder 440 Volt geeinigt. Nachdem wegen des Netzverlustes die Spannung in der Zentrale entsprechend höher gehalten werden muß, ist der Meßbereich des Instrumentes ebenfalls für diese Erhöhung ausreichend zu wählen. Um möglichst große Skalenintervalle für einen dem Meßinstrument eigenen Maximalausschlag zu erhalten, wären im allgemeinen Meßbereiche bis 130, 260 und 520 Volt genügend. Ist jedoch Akkumulatorenbetrieb vorhanden, so muß mit einer Ladespannung gerechnet werden, welche die Normalspannung um 35 bis 40 % übersteigt. Man kommt dadurch zu den Meßbereichen von 150, 300 und 600 Volt, für Bahnbetriebe bis 750 Volt, selten darüber. Daraus hat sich die gebräuchlichste Skaleneinteilung bei tragbaren Kontrollinstrumenten für 150 Intervalle eingebürgert. Diese Einteilung ist für die Skalenlänge der gangbarsten, tragbaren Instrumente insofern besonders günstig, als dem einzelnen Intervall die Breite von etwa 1 Millimeter zufällt. Diese Breite gestattet noch eine dem Geübten leichte und verläßliche Interpolation auf ein Zehntel eines Intervalls.

Die Einheitlichkeit der Skaleneinteilung und Größe der verschiedenen Intervalle bei verschiedenen Instrumenten ist von nicht zu unterschätzender Wichtigkeit. Die Präzision der Schätzungsfähigkeit des Auges auf Dezimalen eines Intervalles wird durch diese Einheitlichkeit beträchtlich erhöht. Aus diesem Grunde ist auch die Wahl einer gleichen 150-teiligen Skala für die Strommesser zu empfehlen, obgleich bei diesen der Bedarf der Mannigfaltigkeit der Meßbereiche ein viel größerer ist als bei den Spannungsmessern. Das Zutreffende des Gesagten kann man am leichtesten dadurch prüfen, daß man gleichzeitige Ablesungen an einer 150-teiligen Skala eines Voltmeters und an einer 100-teiligen Skala eines Amperemeters zu machen versucht.

Es erfordert dabei eine sehr beträchtliche Übung, um mit gleicher Genauigkeit und Schnelligkeit an den beiden Skalen die Dezimalen zu interpolieren.

Erhält das Instrument nur ein Meßbereich, so ist die Bezifferung der Skala im allgemeinen wenig zweifelhaft. Außer der natürlichsten Bezifferung in Skalenteilen von 10 zu 10 Intervallen kann man, wenn das einzelne Intervall nicht die Einheit, z. B. 1 Volt oder 1 Ampere angibt, sondern einen Bruchteil oder ein Vielfaches dieser Einheit, die Bezifferung in diesen Bruchteilen oder Vielfachen durchführen. Diese Art der Bezifferung ist jedoch nur für die Ablesung der ganzen Intervalle von Vorteil, bei der Interpolation der Dezimalen eines Intervalles bleibt eine Umrechnung unerläßlich.

Besitzt ein Instrument mehrere Meßbereiche, so ist die Bezifferung lediglich in Intervallen zweckmäßig und richtig. Man wird sich alsdann ein für alle Mal daran gewöhnen, eine Ablesung in Intervallen und deren Dezimalen vorzunehmen und das so erhaltene Ablesungsresultat mit der Multiplikationskonstante des betreffenden Meßbereiches multiplizieren. Unter Multipikationskonstante versteht man den Wert eines Skalengrades in der betreffenden Einheit; diese ist zweckmäßig an geeigneter Stelle auf dem Instrument anzubringen. Für eine 150-teilige Skala z. B.:

Meßbereich	3	Volt,	$1^0 = 0{\cdot}02$	Volt
„	150	„	$1^0 = 1$	„
„	300	„	$1^0 = 2$	„
„	750	„	$1^0 = 5$	„

13. Allgemeines über Schalttafelinstrumente.

Um Wiederholungen bei der Beschreibung der verschiedenen Gattungen von technischen Meßinstrumenten zu vermeiden, sollen allgemeine Eigenschaften der Schalttafelinstrumente zusammengefaßt werden. Diese Eigenschaften beziehen sich in der Hauptsache auf besondere Anordnungen und konstruktive Einzelheiten, welche durch die Verwendungsweise dieser Instrumente bedingt werden.

Die gebräuchlichste Form der Schalttafelinstrumente ist die Dosenform. Im Laufe der Zeit haben sich normale Dimensionen für die Instrumentengehäuse herausgebildet, so daß mit Vorliebe von Schalttafelkonstrukteuren die Gehäusedurchmesser vorgeschrieben werden. Richtiger und zweckentsprechender ist die Spezifikation der Skalenlänge eines Schalttafelinstrumentes.

Es ist eine bekannte Tatsache, daß die Materialkosten im Bau der Meßinstrumente eine untergeordnete Rolle spielen; dagegen wachsen die Konstruktionsschwierigkeiten mit zunehmender Zeiger- und Skalenlänge beträchtlich. Da auf einer Schalttafel der für Meßinstrumente vorgesehene Raum meist beschränkt ist, die Instrumente jedoch stets auf eine beträchtliche Entfernung bequem ablesbar sein sollen, so ist unter Annahme gleich guter sonstiger Qualitäten das zweckmäßigste Instrument dasjenige, welches für die kleinste Raumbeanspruchung die größte Skala besitzt.

Eine vorteilhafte Anordnung ist das Versenken der Schalttafelinstrumente in die Schalttafel. Für Instrumente mit durchscheinender und von rückwärts beleuchteter Skala bringt diese Anordnung die Skala besonders günstig zur Geltung.

Für Instrumente, welche z. B. als Generalvoltmeter ein Ablesen der Skala aus großer Entfernung gestatten sollen, ist die Dosenform wegen der ungünstigen Raumbeanspruchung unvorteilhaft, so daß sich für derartige

Instrumente verschiedene von der althergebrachten Schablone abweichende Formen herausgebildet haben. Für kleine Motorenschalttafeln und besonders für den Automobilbetrieb hat sich neuerdings die Verwendung zweier in einem Gehäuse kombinierten Instrumentensysteme eingebürgert (Fig. 21). Dieselbe besitzt in bezug auf räumliche Beanspruchung Vorteile, hat jedoch

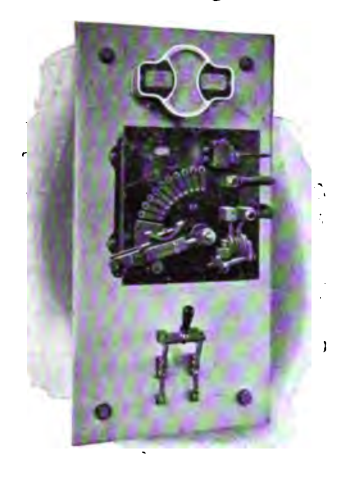


Fig. 21.



Fig. 22.

den Nachteil, daß bei der Beschädigung eines der Systeme beide Instrumente der Benutzung entzogen werden.

Besonders erwähnenswert ist das von WESTON und VAN VLECK DRP. Nr. 80327 eingeführte sogenannte Profilsystem (Fig. 22), das sich in Amerika

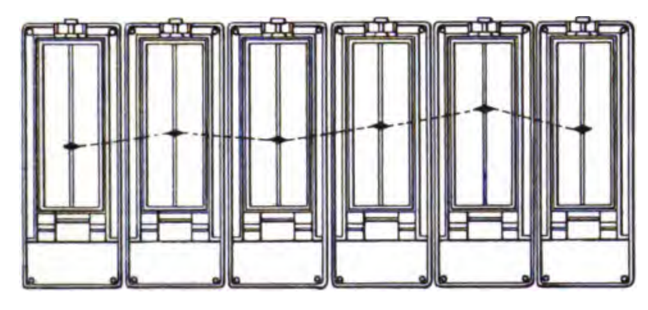


Fig. 23.

und England schnell Eingang verschafft hat und neuerdings auch in Deutschland für größere Anlagen in Aufnahme zu kommen scheint. Mit geringster seitlicher Raumbeanspruchung verbindet dieses System den Vorteil großer Übersichtlichkeit. So bildet z. B. eine Verbindungslinie, welche durch die Zeigerköpfe einer größeren Gruppe nach diesem System nebeneinander angeordneter Amperemeter gezogen gedacht wird, eine Kurve der Belastungsverteilung in der Zentrale (Fig. 23). Das Regulieren und gleichmäßige Verteilen der Belastung auf die verschiedenen Speiseleitungen wird dadurch ungemein erleichtert, da das Bedienungspersonal nur darauf zu achten hat, daß die Verbindungslinien der Zeigerköpfe der in Betrieb befindlichen Amperemeter möglichst eine gerade Horizontale bilden. Um die Ablesung der Gesamtheit der Skala auch in nächster Nähe an der Schalttafel zu ge-

statten — ein wichtiger Umstand, wenn die Schalttafel mit einer Gallerie versehen ist — ist das Instrumentengehäuse drehbar angeordnet, so daß man dasselbe für einen entsprechenden Gesichtswinkel, von dem man die Gesamtheit der Skala überblicken kann, einstellt.

18. Energieverbrauch.

Die Wahl der Schalttafelinstrumente sollte nicht allein von der Güte der Konstruktion in mechanischer und elektrischer Beziehung, sondern auch von dem Verbrauch an Energie in denselben abhängig gemacht werden. Die Anschaffungskosten für die Instrumente sind einmalige, während die Betriebskosten für dieselben jahrein jahraus fortlaufen. Es ist daher von Wichtigkeit, daß diese Kosten in einem richtigen Verhältnis zueinander stehen.

Für Gleichstromanlagen kann diese Frage als zugunsten der Instrumente der Weston-Type entschieden betrachtet werden, obgleich elektrostatische Instrumente in bezug auf geringen Energieverbrauch auf den ersten Blick als die günstigsten erscheinen würden. Diese kommen jedoch zum Zweck der Strommessung garnicht und für Spannungsmessung im allgemeinen nur für hohe Spannungen in Betracht.

Am ungünstigsten gestaltet sich das Verhältnis für die Hitzdrahtinstrumente, so daß sie für Gleichstromanlagen überhaupt außer Frage kommen sollten.

Eine Vergleichung der verschiedenen Instrumententypen auf ihren Energieverbrauch wird leider durch die Spärlichkeit der diesbezüglichen Angaben der Fabrikanten erschwert. Für eine vollständige Spezifikation zum Zwecke der vergleichenden Bewertung verschiedener Fabrikate sollten derartige Angaben vorhanden sein, ebenso wie die Angaben der Skalenlängen und des Verhältnisses der kontrollierenden Kraft des beweglichen Systems zu dessen Gewicht.

Um eine allgemeine Übersicht über die verschiedenen Instrumentensysteme in bezug auf Energieverbrauch zu geben, sind die zurzeit bekannten Maxima und Minima verbreiteter Fabrikate tabellarisch zusammengestellt. Mit Hilfe dieser Tabelle kann eine für praktische Zwecke genügende Vergleichung angestellt werden, die außerdem für den einzelnen Fall noch durch die in den Spezifikationen zu verlangenden Angaben eingehender gestaltet werden kann.

Angaben über Energieverbrauch der Weicheisen-Strommesser konnten tabellarisch nicht durchgeführt werden, da die Werte für verschiedene Stromstärken zu stark schwanken. Der Zweck der Tabelle ist in erster Linie der, daß man an Hand derselben allgemein die verschiedenen Instrumententypen auf ihren voraussichtlichen Energieverbrauch einschätzen kann.

Tabelle 2.

Voltmeter.

	Strom für vollen Skalenausschlag			Wattverbrauch per Volt pro Jahr dauernd eingeschaltet
	Min. Ampere	Mittel Ampere	Max. Ampere	Mittel
Weston-Type	0·005	0·01	0·05	0·088 KW.-Stunden
Weicheisen	0·02	0·05	0·10	0·440 „ „
Ferraris (Indukt.)	—	0·06	—	0·528 „ „
Hitzdraht	0·10	0·15	0·20	1·320 „ „

Amperemeter.

	Spannungsabfall am Nebenschluß des Instruments			Wattverbrauch per Amp. pro Jahr, dauernde Belastung
	Min. Volt	Mittel Volt	Max. Volt	Mittel
WESTON-Type	0·03	0·05	0·15	0·440 KW.-Stdn.
Hitzdraht	0·17	0·20	0·30	1·760 „ „
Ferraris mit Umformer	—	1·80	—	7·92 insgesamt für 5 Amp. sekundär

Außer den für die Amperemeter in der Tabelle gemachten Angaben ist noch für alle solche Strommesser, die nicht an einem Nebenschlußwiderstand liegen, der Spannungsabfall in den mehr oder weniger langen Stromzuleitungen mitzurechnen; diese Verluste sind unter Umständen erheblich.

Als Nutzanwendung obiger Tabelle für Voltmeter sei folgender Fall genommen:

Eine Zentralschalttafel ist mit 10 Hitzdraht-Voltmetern für 220 Volt versehen.

Der Wattverbrauch pro Jahr für diese Instrumente beträgt im Mittel:

$$10 \times 1{\cdot}320 \times 220 \text{ KW.} = 2904 \text{ KW.-Stunden.}$$

Die Kohlenkosten der KW.-Stunde zu Mk. 0·06 gerechnet, betragen die jährlichen Betriebskosten für die 10 Instrumente Mk. 174.—.

10 Instrumente der WESTON-Type verbrauchen

$$10 \times 0{\cdot}088 \times 220 = 194 \text{ KW.-Stunden.}$$

In gleicher Weise unter Annahme der Kohlenkosten zu Mk. 0·06 betragen die jährlichen Betriebskosten für diese 10 Instrumente rund Mk. 12.—.

Die Differenz von Mk. 162 pro Jahr repräsentiert eine zehnjährige Amortisation eines Kapitals von Mk. 1620 zu 10 %. Entfernt man daher die 10 Hitzdrahtinstrumente und ersetzt dieselben durch 10 der WESTON-Type zum Einzelpreis von Mk. 162, so sind diese 10 neuen Instrumente nach 10 Jahren amortisiert. Wie aus der Tabelle ersichtlich, muß ganz allgemein bei Wechselstrominstrumenten mit höherem Eigenverbrauch gerechnet werden.

Sehr wichtig ist ein derartiger Betriebskostenüberschlag für registrierende Instrumente, da diese in der Regel beträchtliche Energiemengen verbrauchen. Es ist dies wohl auch als ein Grund dafür anzusehen, daß diese Instrumente im Schalttafelbetrieb der Zentralen keine ausgedehntere Verwendung gefunden haben.

B. Beschreibung der gebräuchlichsten technischen Instrumente.

I. Weston-Instrumente.

14. Geschichtliches über Weston-Instrumente.

In Jahre 1880 schlug DEPREZ ein Meßinstrument mit direkter Ablesung (Fig. 24) vor, in welchem ein Dauermagnet ein rostartiges Stück Weicheisen magnetisch polarisiert. Ein stromführender Leiter B wirkt auf das drehbar angeordnete Eisenstück A ablenkend. Durch empirische Eichung wird das Verhältnis zwischen Ablenkung und dem dieselbe hervorrufenden Strom bestimmt. Die Empfindlichkeit dieses Instrumentes war gering und die Skala sehr ungleichmäßig. Verbesserungen in dieser Beziehung zeigen die auf demselben Prinzip konstruierten Instrumente von AYRTON und PERRY (Fig. 25) (1880) und CARPENTIER (Fig. 26).

Der Umstand, daß die Pole des Dauermagneten bei diesen Konstruktionen weit

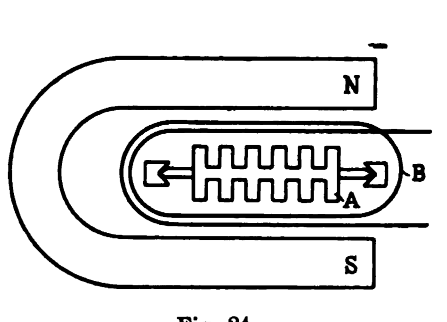



Fig. 24.

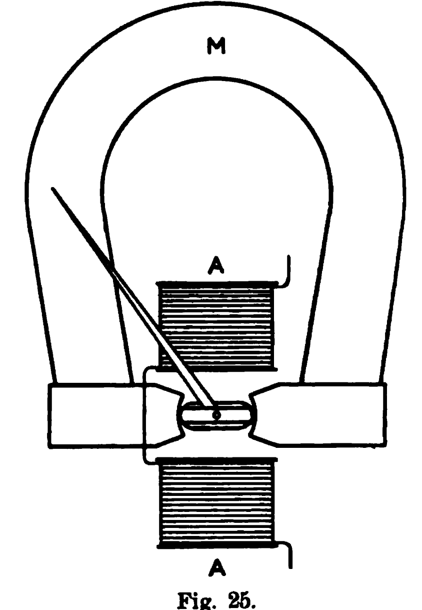


Fig. 25.

voneinander getrennt sind und daß zwischen diesen Polen eine stromführende Spule mit ziemlich hoher Amperewindungszahl schwächend oder stärkend auf den Magneten wirken muß, war der Hauptgrund, daß die nach diesem Prinzip konstruierten Instrumente sehr bald in einen schlechten Ruf bezüglich der Konstanz ihrer Angaben kamen. Dies ging soweit, daß man die Verwendbarkeit von permanenten Magneten auf Grund dieser Erfahrungen überhaupt für quantitative Messungen verwarf und daß z. B. AYRTON und PERRY selbst im Jahre 1883 auf Weicheiseninstrumente zurückkamen (Magnifying spring ammeters).

Abgesehen von irgend welcher Prioritätsfrage ist es unstreitig ein hervorragendes Verdienst WESTONS um die elektrische Meßtechnik, die Brauchbarkeit des permanenten Magneten für elektrische Meßinstrumente so erfolgreich bewiesen zu haben, daß gegenwärtig weitaus die wichtigsten und gebräuchlichsten technischen Meßinstrumente für Gleichstrommessungen solche mit

einem permanenten Magnetsystem sind, wie sie in einwandsfreier Konstruktion zuerst von WESTON Anfang 1888 in die Öffentlichkeit gebracht wurden. In gebührender Würdigung der bahnbrechenden Tätigkeit Dr. WESTONS und seiner Verdienste um die Meßtechnik im allgemeinen sollen im Folgenden mit dem Namen „WESTON-Instrumente" alle diejenigen Instrumente bezeichnet werden, deren Wesen in einem durch einen Dauermagneten gebildeten gleichmäßigen Magnetfelde besteht, in welchem ein den zu messenden Strom führender Leiter in Form einer Spule drehbar angeordnet ist.

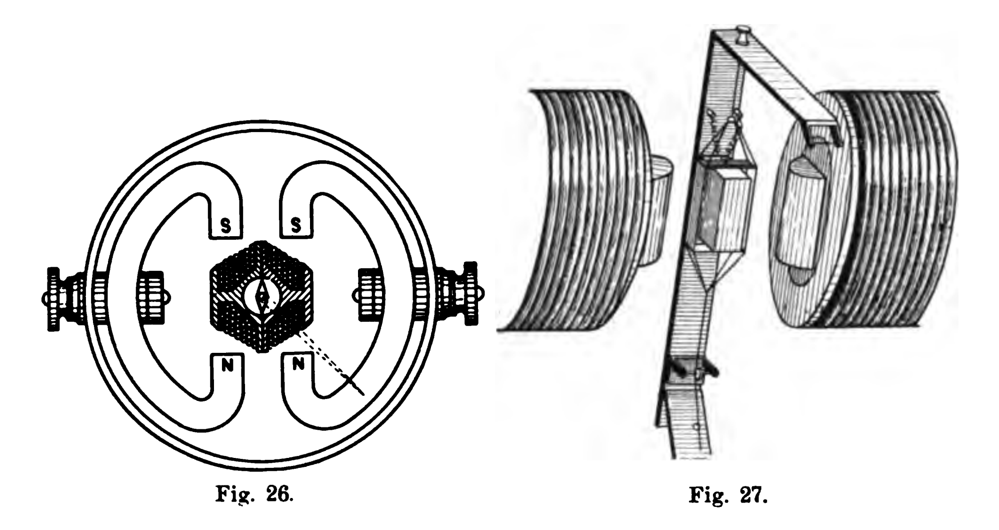


Fig. 26. Fig. 27.

Abgesehen von den klassischen Experimenten Amperes im Jahre 1822 (Recueil d'observations electrodynamiques), welche von einem drehbaren, stromführenden Leiter, der durch einen permanenten Magnet abgelenkt wird, handeln, ist wohl als erster Vorläufer dieser Instrumente der Siphon Recorder von Sir WILLIAM THOMSON (Fig. 27), jetzt Lord KELVIN, zu betrachten. Die ersten Patente desselben datieren aus dem Jahre 1867.

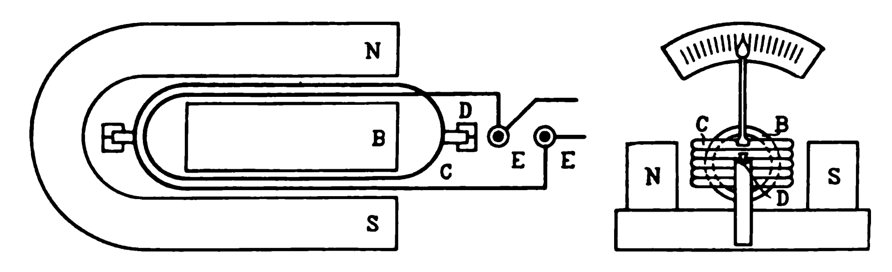


Fig. 28.

In CLERK MAXWELL „Treatise on Electricity and Magnetism" Ausgabe 1873, findet sich im 2. Band, Seite 326, Artikel 722 folgende Bemerkung bezüglich dieses Systems:

„The suspended coil may be used as an exceedingly sensitive galvanometer".

Unabhängig von den Arbeiten Lord KELVINS scheint D'ARSONVAL die sogenannten DEPREZ-D'ARSONVALschen Galvanometer in Frankreich angegeben zu haben (1881), Fig. 28. Das wohlbekannte Spiegelgalvanometer von

D'ARSONVAL stammt aus dem Jahre 1889, so daß die ersten WESTONschen Patente dieser Anordnung drei Jahre vorangehen.

Die ersten Konstruktionen WESTONS lehnen sich an die Form des Siphon Recorders an. Fig. 29 ist die Abbildung aus dem WESTONschen USA. Patent Nr. 334 145 vom 12. Jan. 1886. Die erste Konstruktion der WESTON-Instrumente in ihrer heutigen Form stammt aus dem Jahre 1887, und das maß-

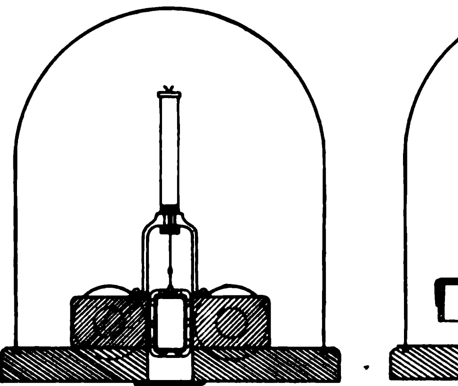
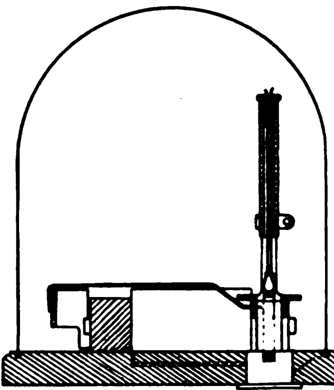



Fig. 29.

gebende Patent WESTONS ist das USA.-Patent 392 386 vom 6. Nov. 1888. Diese Patentbeschreibung enthält alle wichtigen Elemente des heutigen WESTON-Instrumentes und alle technischen Meßinstrumente, die auf diesem

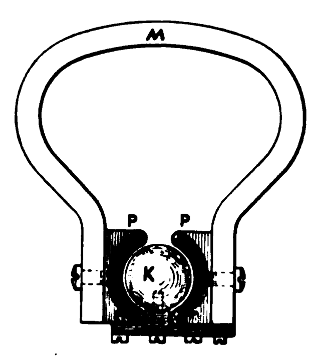




Fig. 30.



Fig. 31.

Prinzip beruhen, lehnen sich mehr oder weniger an diese WESTONsche Konstruktion an.

So vollkommen die ersten von WESTON konstruierten Instrumente im Vergleich zu den damals (1888) existierenden erschienen, so ist doch im Laufe der Jahre einer der wesentlichsten Bestandteile der Konstruktion, nämlich die Drehspule, wichtigen Verbesserungen unterworfen worden. Um diese Verbesserungen als solche erkennen zu können, ist es notwendig, die Eigenschaften festzustellen, welche die Konstanz der Eichung und die mechanische Widerstandsfähigkeit des Instrumentes bedingen.

In den WESTON-Instrumenten unterscheidet man folgende Hauptbestandteile: (Fig. 30 u. 31).

a) Der Dauermagnet *M*.
b) Die Polschuhe aus Weicheisen *P*. In einigen Konstruktionen sind diese Polschuhe nicht vorhanden, die Pole des Magneten selbst bilden alsdann einen zylindrischen Raum.
c) Der Eisenkern *K*, konzentrisch zum zylindrischen Raum der Polschuhe oder Pole angeordnet.
d) Die Drehspule *S*, welche sich um ihre Mittelachse im Luftzwischenraum, der von Polschuhen und Kern gebildet wird, frei drehen kann.
e) Die Stromzuleitung zur Drehspule, in der Regel aus nichtmagnetischen Spiralfedern bestehend, welche zugleich die richtende Gegenkraft für die Drehspule bilden.

Zeigervorrichtung und Skala sind sämtlichen direkt zeigenden Instrumenten eigen und bedürfen hier keiner besonderen Erwähnung.

Die Konstanz der Eichung eines Weston-Instrumentes ist in erster Linie von der Konstanz des Dauermagneten, sodann von der Konstanz der Elastizität der die richtende Gegenkraft bildenden Spiralfedern abhängig.

15. Der Dauermagnet.

Die Konstanz der Dauermagnete ist bedingt durch die Art der Magnetisierung, durch die natürliche und künstliche Alterung derselben — alles meist streng bewahrte Fabrikationsgeheimnisse —; in begrenztem Maße durch das Material, ganz wesentlich durch den Luftzwischenraum zwischen den Polen. Unter sonst gleichen Bedingungen wird ein Magnetsy tem mit dem kleinsten interpolaren Luftzwischenraum die beste Konstanz zeigen. Es liegt auf der Hand, daß bei möglichst kleinem interpolaren Luftzwischenraum die magnetische Streuung gering ist; hiermit wird ferner eine günstigere Ausnutzung des Magnetfeldes der Dauermagnete erreicht. Das auf diese Weise erzielte intensivere Magnetfeld wird dementsprechend auch geringerer Beeinflussung durch äußere magnetische Felder unterliegen.

Eine einwandfreie Vergleichung verschiedener Konstruktionen in bezug auf dieses wichtige Konstruktionselement des interpolaren Zwischenraumes ließe sich nur unter der Annahme eines gleichen Magnetmaterials vornehmen. Verallgemeinernd läßt sich jedoch feststellen, daß dasjenige System die besten Resultate ergeben wird, in welchem das Verhältnis der Länge des Magneten zu dessen Querschnitt mindestens 100 mal dem Verhältnis der Länge des interpolaren Zwischenraumes zu dessen aktiven Querschnitt ist. Bezeichnet man mit

l_m = Länge des Magneten
q_m = Querschnitt des Magneten
l_p = Polarer Zwischenraum
q_p = Querschnitt des interpolaren Zwischenraumes

so muß $\frac{l_m}{q_m}$ größer sein als $\frac{l_p}{q_p} \times 100$.

Kolonne 5 der Tabelle 3 enthält die Größe $k = \frac{l_m}{q_m} \times \frac{q_p}{l_p}$ für eine Anzahl Systeme dieser Art. Diese Zahl durch 100 dividiert ergibt den sogenannten Sicherheitsfaktor der Entmagnetisierung des betreffenden Systems.

Mit Ausnahme der Nummern 19 und 20 der Tabelle 3 wird diese Zahl 100 erreicht, von den meisten sogar mehrfach überschritten. Erfahrungsgemäß ist mit Sicherheit anzunehmen, daß die mit 19 und 20 bezeichneten Systeme in bezug auf Konstanz unzuverlässig sind, während auf der anderen

Hand Instrumente mit sehr hohem Sicherheitsfaktor der Entmagnetisierung sich durch besondere Konstanz der magnetischen Verhältnisse auszeichnen.

Eine weitere wichtige Erfahrung, die wenig bekannt ist, besteht darin, daß die Empfindlichkeit des Instrumentes nach dem Zusammensetzen desselben merklich zunimmt. Trotz sogenannter künstlicher Alterungsverfahren, welche die Periode der Empfindlichkeitszunahme abkürzen sollen, wird ein verläßliches magnetisches Gleichgewicht erst nach Wochen, bei hohen Anforderungen erst nach Monaten erreicht. Dieser Umstand ist wichtig in allen Fällen von Reparaturen, welche eine Auseinandernahme des Instrumentes bedingen. In solchen Fällen wird dem Fabrikanten nur unter größten Remonstrationen die nötige Wartezeit zur Ausführung gewissenhafter Arbeit gelassen.

16. Polschuhe und Eisenkern. Mit Ausnahme von nur 3 in der Tabelle 3 aufgeführten Konstruktionen sind die Dauermagnete mit Polschuhen versehen. Deren sich zugewandte Flächen bilden einen zylindrischen, in der Konstruktion des Instrumentes von Dr. R. Franke einen kugelförmigen Hohlraum, in welchem möglichst genau zentrisch ein der Form des Hohlraums entsprechender Eisenkern gelagert ist. Durch Polschuhe und Eisenkern wird der interpolare Luftzwischenraum gebildet, in welchem die Drehspule des Instrumentes angeordnet ist.

Die solide und sorgfältige Konstruktion dieses Teiles des Instrumentensystems bestimmt in erster Linie mit die Qualität desselben. Von der genau zentrischen Anordnung des Eisenkernes zwischen den Polen des Magneten oder den Polschuhflächen hängt die Gleichmäßigkeit der Skala des Instrumentes ab.

Bei der Besprechung der Skalencharakteristiken wurde erwähnt und durch Versuche dargetan, daß durch geringes Anziehen der das System zusammenhaltenden Schrauben eine beträchtliche Änderung in dem Charakter der Skala eintreten kann. Daraus folgt die Wichtigkeit der möglichst soliden Konstruktion des Polschuhsystemes und dessen Verbindung mit dem Magneten.

Die Verbindung der Polschuhe unter sich geschieht in der Mehrzahl der Konstruktionen durch Verschrauben mit Platten aus nicht magnetischem Material, welche zugleich die Auflageflächen für den Eisenkern bilden. In einigen neueren Konstruktionen (z. B. Reiniger, Gebbert & Schall) wird die Verbindung der Polschuhe dadurch bewirkt, daß dieselben in eine Kompositionsmasse vermittelst Coquillengusses eingebettet sind.

Die aus weichstem Schmiedeeisen hergestellten Polschuhe oder die dieselben verbindenden Polschuhplatten dienen zugleich zur Anbringung der Lagerböcke, welche die Steinlager für die Drehspule tragen.

In Tabelle 3 unter 18 bis 20 sind 3 Konstruktionen aufgeführt, in denen die Polschuhe ganz fehlen. Die Vereinfachung der Konstruktion, welche dadurch erreicht ist, wird teilweise durch die Schwierigkeit ausgeglichen, eine möglichst genaue Zentrierung des Eisenkernes und der Lager für die Drehspule zum interpolaren Luftswischenraum zu erreichen. Um die nötigen Befestigungspunkte dafür zu erhalten, muß der Magnet vor dem Härten mit Bohrungen versehen werden, deren gegenseitige genaue Lage durch das Härten leicht verändert wird. Um diese Schwierigkeit zu beseitigen, versieht Weston nach einer patentierten Konstruktion den Magneten mit verhältnismäßig großen Bohrungen, welche nach dem Härten mit einem Stück Weicheisen ausgefüllt werden. In diese Weicheisenstücke werden nachträglich

Tabelle 3.

Magnetsysteme einiger Schalttafelvoltmeter der WESTON-Type. In alphabetischer Ordnung. Messungen aus den Jahren 1902 bis 1906. Größenangaben in Millimeter.

	1	2	3	4	5	6
	Magnet		Polschuhe wirksame Oberfläche	Interpolarer Luftzwischenraum		Sicherheitsfaktor der Entmagnetisierung
	Länge l_m	Querschnitt q_m	q_p	l_p	$k = \frac{l_m\, q_p}{l_p\, q_m}$	
1. Allgemeine Elektr.-Ges. Berlin	290	400	1000	3·4	213	2·1₈
2. Carpentier, Paris	320	300	900	4·0	240	2·4
3. Compagnie Volta, Paris (Meylan)	270	300	600	2·2	245	2·5
4. Elliott Bros London	266	455	990	2·8	207	2·1
5. Evershed & Vignoles, London	290	200	400	4·5	130	1·3
6. Dr. R. Franke (Land- u. Seekabelwerke)	290	250	800	3·0	310	3·1
7. Gaiffe, G., Paris (Meylan)	280	220	950	2·5	480	4·8
8. Gans und Goldschmidt, Berlin	370	220	700	2·9	400	4·0
9. Hartmann und Braun, Frankfurt	270	270	700	3·5	200	2·0
10. Keiser und Schmidt, Berlin	340	300	1000	3·2	350	3·5
11. Kelvin u. White, Glasgow	280	450	1200	5·2	270	2·7
12. Dr. P. Meyer, A.-G., Berlin	300	450	1200	2·6	200	2·0
13. Nalder Bros, London	280	350	900	4·8	340	3·4
14. Reiniger, Gebbert, Schall, Erlangen	300	300	1000	2·9	340	3·4
15. Siemens & Halske, Berlin	330	350	950	3·8	240	2·4
16. Schöller, A., Frankfurt a. M.	300	180	480	4·3	190	1·9
17. Weston, Electrical Instr. Company	330	330	1100	2·2	500	5·0
18. Abrahamsohn, Berlin (ohne Polschuhe)	250	310	650	4·5	310	3·1
19. Chauvin & Arnoux, Paris (ohne Polschuhe)	250	260	270	7·5	35	—
20. Elektrotechn. Institut, Frankfurt (ohne Polschuhe)	270	400	370	4·4	60	—

genau nach Lehre Gewindelöcher eingeschnitten, welche zur Befestigung des Trägers für den Eisenkern und die Drehspule dienen.

Trotz aller mechanischer Sicherheitsmaßregeln ist die für die höchste Präzision erwünschte Konstanz der Skalencharakteristik nur durch ein längeres Lagern der vollständig montierten Systeme zu erreichen. Eine Auseinandernahme der Systeme zerstört für jeden einzelnen Fall diese Konstanz, die wiederum erst durch entsprechende Lagerung erreicht werden kann.

17. Die Drehspule. Einen der wichtigsten Teile der Instrumente des WESTON-Typus bildet die Drehspule. Die von WESTON angegebene Konstruktion derselben ist mit

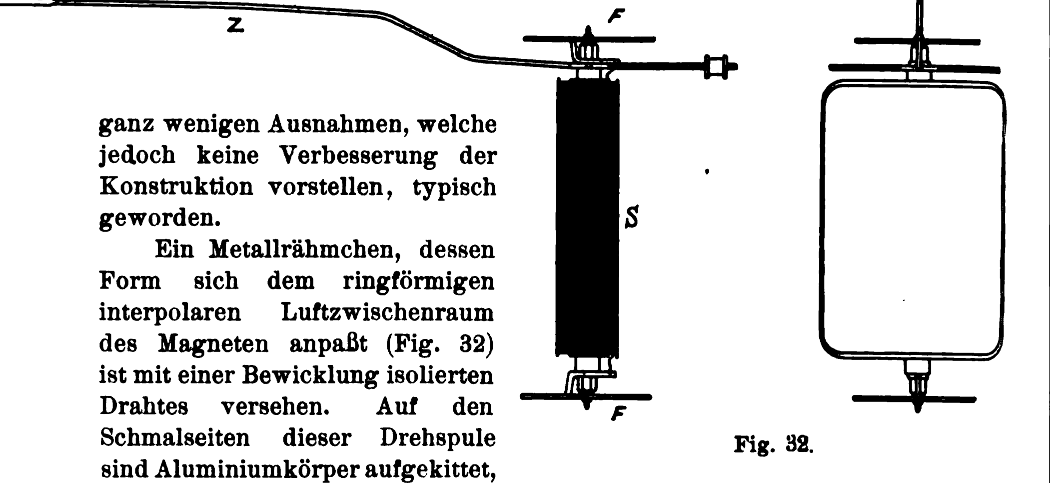


Fig. 32.

ganz wenigen Ausnahmen, welche jedoch keine Verbesserung der Konstruktion vorstellen, typisch geworden.

Ein Metallrähmchen, dessen Form sich dem ringförmigen interpolaren Luftzwischenraum des Magneten anpaßt (Fig. 32) ist mit einer Bewicklung isolierten Drahtes versehen. Auf den Schmalseiten dieser Drehspule sind Aluminiumkörper aufgekittet, welche als Träger der die Stromzuleitungen bildenden Spiralfedern und des Zeigerwerkes dienen und gleichzeitig die fein polierten, glasharten Stahlspitzen tragen, auf welchen die Drehspule spielt. In einigen Konstruktionen bilden diese Spitzen die Enden eines durch die Längenachse der Spule gehenden Stahlstäbchens. Diese starre Verbindung des Rähmchens ist gegenüber der oben erwähnten Konstruktion der aufgekitteten Spitzen nachteilig, indem die elastische Nachgiebigkeit des Rähmchens und die damit verbundene Schonung der Stahlspitzen gegen mechanische Beschädigung in Fortfall kommt.



Fig. 33.

Eine wesentliche Abweichung von dieser Form zeigt die von EVERSHED angegebene Konstruktion (Fig. 33). Der untere Teil der Drehspule ist ringförmig geöffnet, und das Rähmchen hängt nur mit einem Ende an einer durchgehenden Stahlachse. Diese Form bietet

für den Fabrikanten den Vorteil, daß die Spule in das fertig montierte System von Polschuhen und Kern eingeführt oder aus demselben entfernt werden kann, ohne daß eine Auseinandernahme desselben notwendig ist.

Der Nachteil der Konstruktion besteht in dem verhältnismäßig großen Gewicht der Drehspule (6·75 Gramm).

18. Bewickelung der Drehspule.

Je nachdem das Instrument zur Messung von Spannungen oder Stromstärken dienen soll, ist die Bewickelung des Rähmchens eine verschiedene. Für Spannungsmessungen ist die Bedingung für die Bewickelung dadurch gegeben, daß der Stromverbrauch des Instrumentes ein möglichst geringer und für eine bestimmte Voltzahl der Widerstand ein möglichst hoher ist.

Für tragbare Instrumente wird als genügend hoher Widerstand häufig ein runder Widerstand von 100 Ohm per Volt für vollen Skalenausschlag genommen. Für besondere Zwecke kann man diesen leicht auf das Doppelte steigern. Eine praktische Grenze höchsten Widerstandes für in Spitzen gelagerte Systeme dieser Art liegt bei etwa 2000 Ohm per Volt. Derartige hochempfindliche Instrumente verlangen jedoch bereits eine sehr subtile Behandlung, nachdem das Gewicht der Drehspule im Vergleich zur kontrollierenden Kraft der Spiralfedern bereits die erfahrungsmäßige Grenze überschreitet. Die Bewickelung der Voltmeterdrehspule besteht meist aus dünnem mit Seide umsponnenen Kupferdraht. Der Widerstand derselben ist für verschiedene Fabrikate und für verschiedene Zwecke der Anwendung des Instrumentes ebenso verschieden und liegt zwischen den Grenzen von etwa 5 bis 300 Ohm. Die Spulen mit niedrigem Widerstand, verwendet man für Instrumente mit entsprechend niedrigen Meßbereichen, da man die Temperaturabhängigkeit der Drehspule dadurch zum Verschwinden bringt, daß der Kupferwiderstand der Drehspule gegen den gewöhnlich aus Manganin gebildeten Vorschaltwiderstand, oder wenigstens dessen Änderung mit der Temperatur gegen den Gesamtwiderstand verschwindend klein wird. Es wurde bereits in dem Kapitel über allgemeine Beeinflussungen durch Temperaturänderung erwähnt, daß diese Instrumente einen sogenannten „Instrumentenkoeffizienten“ besitzen, welcher von den Widerstandsveränderungen selbst vollständig unabhängig ist. Würde man z. B. die Drehspule eines Voltmeters mit Manganindraht bewickeln, so besäße das Instrument, soweit wie dessen Widerstand in Betracht kommt, praktisch keinen Temperaturkoeffizienten. Der Instrumentenkoeffizient (Spiralfedern, magnetisches Feld) verursacht, daß mit zunehmender Temperatur das Instrument in der Regel etwas empfindlicher wird. Dieser Instrumentenkoeffizient läßt sich leicht dadurch zum Verschwinden bringen, daß man als Vorschaltwiderstand ein Material von entsprechendem Temperaturkoeffizienten wählt. Am leichtesten läßt sich eine derartige Kompensation dadurch ausführen, daß man eine gemischte Wickelung von Kupfer und Manganin anwendet. Den Kupferdraht disponiert man alsdann in einer solchen Weise, daß er durch Stromwärme möglichst wenig beeinflußt werden kann. Würde diese Vorsichtsmaßregel nicht angewendet, so würde bei langdauernder Einschaltung der Widerstand des Kupfers erheblicher zunehmen, als dies die Kompensation des Temperaturkoeffizienten verlangt. Da der Instrumentenkoeffizient bei Instrumenten der Weston-Type verhältnismäßig klein ist, so werden derartige Kompensationen nur für die Instrumente allerhöchster Präzision, so z. B. für die Laboratoriumnormalinstrumente der Weston-Gesellschaft, angewandt. Für diesen Zweck wird der Instrumentenkoeffizient für jedes

dieser Instrumente individuell bestimmt und der Bestimmung dieses Koeffizienten entsprechend das Verhältnis von Kupfer zu Manganinwiderstand für den Vorschaltwiderstand berechnet. Durch dieses Verfahren läßt sich eine außerordentliche Unabhängigkeit von Temperaturbeeinflussungen erreichen.

Da für die Instrumente der WESTON-Type ein prinzipieller Unterschied zwischen Strom- und Spannungsmessern nicht gemacht wird, (eigentlich stellen diese Instrumente sämtlich Strommesser vor), ist der Übergang von einem zum anderen auch nicht scharf getrennt. Instrumente zur Messung niedriger Ströme werden in der Bewickelung der Drehspule den Voltmetern ähneln. Indem jedoch die für die Drehspule gebrauchten Stromzuführungen nur geringe Ströme aufnehmen können, ohne durch Erhitzung zu leiden. ist es notwendig, für die Messung höherer Ströme ein indirektes Meßverfahren zu benutzen, das darin besteht, daß man das Instrument als sogenanntes „Millivoltmeter" ausbildet und mit diesem den Spannungsabfall an einem vom Hauptstrom durchflossenen konstanten Widerstand mißt. Um diesen Widerständen eine handliche Form geben zu können, ist es notwendig, den Spannungsabfall derselben für volle Strombelastung möglichst gering zu wählen. Aus diesem Grunde müssen die Instrumente für eine hohe Voltempfindlichkeit konstruiert werden. Dies wird dadurch erreicht, daß die Bewickelung der Drehspule der für indirekte Strommessung bestimmten Instrumente einen niedrigen OHMschen Widerstand erhält, wie überhaupt der Gesamtwiderstand des Drehspulensystemes einschließlich der Stromzuleitung möglichst niedrig gehalten wird. Die Drehspule eines Millivoltmeters wird daher mit einem verhältnismäßig dicken Kupferdraht bewickelt. Um den Wickelraum der Drehspule für möglichst großen metallischen Querschnitt der Bewickelung auszunutzen, verwendet man anstatt runder Drähte zweckmäßig einen flachen Streifen.[1]

Nachdem, wie erwähnt, die Bewickelung der Drehspule aus einem Material von hoher spezifischer Leitfähigkeit besteht, ein derartiges Material jedoch stets einen hohen Temperaturkoeffizienten besitzt, so haben Millivoltmeter als solche gewöhnlich ebenfalls einen verhältnismäßig hohen Temperaturkoeffizienten. Zum geringeren Teil wird derselbe durch den Instrumentenkoeffizienten ausgeglichen, und zum anderen Teil sucht man sich dadurch zu helfen, daß man einen genügend hohen Vorschaltwiderstand von Manganin anwendet, wodurch der Temperaturkoeffizient des Systems nahezu zum Verschwinden kommt. Eine Methode, welche eine fast genaue Kompensierung des Temperaturkoeffizienten gestattet, und welche zuerst von SWINBURN angegeben worden ist, besteht darin, daß man die Drehspule mit einem Nebenschluß versieht, der einen höheren Temperaturkoeffizienten besitzt als die Drehspule selbst und dem ganzen einen Vorschaltwiderstand ohne Temperaturkoeffizienten gibt. Bezeichnet man den Temperaturkoeffizienten der Drehspule mit α (Fig. 34), denjenigen des dazu parallel liegenden Nebenschlusses mit β, den Widerstand des Nebenschlusses mit w_1 und den dem ganzen vorgeschalteten Widerstand mit w_2, so ist die EMK. an den Klemmen des Instrumentes bei einer gewissen Temperatur

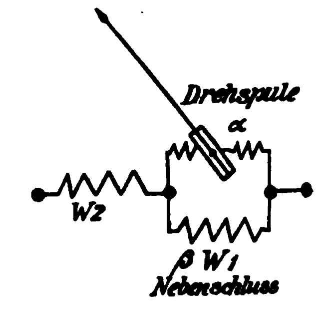


Fig. 34.

[1]) DRP. 150209, 11. Juli 1903.

$$E = \frac{i\,(w_2\,w + w_2\,w_1 + w\,w_1)}{w_1}$$

und bei einer Temperaturdifferenz t

$$E_t = \frac{i\,[w_2\,w\,(1+\alpha\,t) + w_2\,w_1\,(1+\beta\,t) + w\,w_1\,(1+\alpha\,t)\,(1+\beta\,t)]}{w_1\,(1+\beta\,t)}$$

wobei i der Strom in der beweglichen Spule bedeutet. Soll nun die EMK. an den Klemmen des Instrumentes konstant bleiben, so muß

$$E = E_t$$

$$\frac{w_2\,w + w_2\,w_1 + w\,w_1}{w_1} = \frac{w_2\,w\,(1+\alpha t) + w_2\,w_1\,(1+\beta t) + w\,w_1\,(1+\alpha t)\,(1+\beta t)}{w_1\,(1+\beta\,t)}$$

woraus

$$w_2\,w\left(\frac{\beta\,t - \alpha\,t}{1+\beta\,t}\right) = w\,w_1\,\alpha\,t$$

und schließlich:

$$w_2 = w_1\,\frac{\alpha\,(1+\beta\,t)}{\beta - \alpha}.$$

Hierbei stellt der Temperaturkoeffizient der beweglichen Spule α den auf Veränderung des Widerstandes und auf dem Instrumentenkoeffizient des Systems beruhenden Gesamtkoeffizienten dar.

Diese Kompensation des Temperaturkoeffizienten würde eine ideale sein, wenn sie nicht den Nachteil besäße, daß die Veränderung des Koeffizienten um die Punkte, durch welche derselbe durch Null geht, eine große ist. Entsprechen daher die gewählten Widerstände den Bedingungen der vollständigen Kompensation nicht sehr genau, was besondere Schwierigkeiten verursacht, wenn das Instrument einen bestimmten runden Widerstand besitzen soll, so erreicht der Temperaturkoeffizient leicht einen Wert, den man mit einfacheren Mitteln ohne Nebenschluß erhalten kann. Aus diesem Grunde kann man es als praktisch erreichbare Grenze betrachten, wenn der Temperaturkoeffizient eines Millivoltmeters nicht mehr als 0·02 % pro Grad Celsius beträgt.

Der Nachteil dieser Kompensation besteht darin, daß das Instrument, als Milliamperemeter benutzt, einen großen Temperatur-Koeffizienten besitzt. Man hilft sich bei einem derartig kompensierten Instrument dadurch, daß man den zur Kompensation dienenden Nebenschluß vollständig vom Drehspulensystem abschaltet. Sobald man dem wie oben erwähnt kompensierten Instrument einen höheren Widerstand vorschaltet als den, welchen die Formel bedingt, werden die Bedingungen der Kompensation zerstört und das Instrument erhält einen Temperatur-Koeffizienten, der unter Umständen beträchtlich werden kann. Soweit derselbe nicht zu hoch wird, läßt er sich eliminieren, indem man dem Vorschaltwiderstand w_2 selbst einen entsprechenden Temperaturkoeffizienten gibt.

In Tabelle 4 sind in der gleichen Reihenfolge wie in Tabelle 3 tabellarisch die hauptsächlichsten Angaben über die Drehspulen der betreffenden Fabrikate zusammengestellt. Die erste Kolonne enthält die Gewichte der Drehspulen einschließlich der Federn, Zeiger und sämtlichem Zubehör. In Kolonne 2 ist die kontrollierende Kraft der 2 in entgegengesetzter Richtung gewundenen Spiralfedern angegeben, und zwar bezieht sich die Kraft auf die Wirkung der beiden Federn zusammen und ist so zu definieren, daß die

Tabelle 4.

Drehspulensysteme einiger Schalttafelvoltmeter der WESTON-Type. Daten aus den Jahren 1902 bis 1906.

	1	2	3	4	5	6
	Drehspule					
	Gewicht Gramm G	Federkraft Ctm. Gr. K Beide Federn	$\frac{K}{G}$	Strom für vollen Skalenausschlag Amp.	Amperewindungen ca.	3:5
1. Allgemeine Elektr.-Ges., Berlin	2·9	0·68	0·236	0·010	0·35	0·67
2. Carpentier, Paris	5·9	0·84	0·143	0·016	0·96	0·15
3. Compagnie Volta, Paris (Meylan)	4·3	0·95	0·223	0·015	1·17	0·19
4. Elliott, Bros., London	3·1	0·93	0·300	0·025	0·68	0·44
5. Evershed & Vignoles, London	6·8	0·45	0·067	0·012	0·96	0·07
6. Dr. R. Franke (Land- und Seekabelwerke)	2·1	1·33	0·633	0·018	0·90	0·70
7. Gaiffe, G., Paris (Meylan)	6·4	0·90	0·140	0·010	1·50	0·09
8. Gans u. Goldschmidt, Berlin	3·5	0·90	0·258	0·011	0·99	0·25
9. Hartmann u. Braun, Frankfurt	3·9	1·14	0·288	0·016	1·44	0·20
10. Keiser u. Schmidt, Berlin	2·2	1·25	0·582	0·025	0·75	0·78
11. Kelvin u. White, Glasgow	2·6	0·71	0·273	0·024	0·86	0·31
12. Dr. P. Meyer, A.-G., Berlin	2·2	0·83	0·585	0·025	1·07	0·54
13. Nalder, Bros., London	6·4	0·77	0·120	0·010	0·60	0·20
14. Reiniger, Gebbert u. Schall, Erlangen	3·8	0·42	0·111	0·003	0.31	0·36
15. Siemens & Halske, Berlin ältere	6·2	0·72	0·116	0·010	0·88	0·13
15. Siemens & Halske, Berlin neuere	4·0	1·00	0·250	0·017	0·85	0·30
16. Schöller, A., Frankfurt a. M.	2·3	0·63	0·269	0·015	0·75	0·35
17. Weston Electrical Instrum. Co.	1·5	1·00	0·667	0·012	0·72	0·90
18. Abrahamson, Berlin	3·5	0·40	0·115	0·010	0·56	0·20
19. Chauvin u. Arnoux, Paris	3·4	0·39	0·115	0·053	—	—
20. Elektrotechnisches Institut Frankfurt	2·9	0·42	0·146	0·018	1·22	0·12

in der Kolonne angegebene Zahl dasjenige Gewicht in Gramm ausdrückt, welches, in einer Entfernung von 1 cm von der Drehachse der Drehspule wirkend gedacht, der Torsion beider Federn für einen vollen Skalenausschlag Gleichgewicht hält.

Die Kolonne 3 enthält den Quotienten der durch Division von Kolonne 2 durch Kolonne 1 erhalten wird.

Es ist augenscheinlich, daß ein Instrument, welches ein leichtes Drehspulensystem besitzt, und dessen kontrollierende Federkraft groß ist, sich am widerstandsfähigsten in mechanischer Beziehung zeigen muß. Der

Quotient der Kolonne 3 muß demnach bei großer Federkraft und kleinem Gewicht einen entsprechend großen Wert ergeben, und dasjenige der Instrumente wird im Vergleich zu den anderen in mechanischer Beziehung das Widerstandsfähigste sein, bei welchem dieser Quotient am größten ist.

Die Werte in Kolonne 4 und 5 erklären sich selbst. Interessant für die Vergleichung der Instrumente unter sich ist der in Kolonne 6 gebildete Quotient, indem man die Werte der Kolonne 3 durch die Werte in Kolonne 5 dividiert. Wenn wir die Werte der Kolonne 3 als mechanischen Sicherheitsfaktor bezeichnen, so muß, derselben Überlegungsbahn folgend, dasjenige Instrument in elektrischer Beziehung am günstigsten sein, das einen möglichst hohen mechanischen Sicherheitsfaktor mit einer möglichst geringen Anzahl von Amperewindungen erreicht. Es wird daher wiederum der in Kolonne 6 angegebene Quotient für dasjenige Instrument am größten sein, welches sowohl in mechanischer als auch in elektrischer Beziehung die besten Eigenschaften besitzt.

19. Die Stromzuleitungen zur Drehspule.

Wie aus den Fig. 27 u. 29 ersichtlich, wurden in den ursprünglichen Instrumenten von THOMSON, WESTON und D'ARSONVAL die Zuleitungen zu den Drehspulen aus Metalldrähten gebildet. Diese Aufhängung der Drehspule hat den Vorteil, daß sie, sofern nicht elastische Nachwirkungen in der Aufhängung zur Geltung kommen, reibungsfrei funktioniert. Die Verwendung von flachen Spiralfedern als kontrollierende Kraft in technischen Instrumenten war vor dem Erscheinen der WESTON-Instrumente verschwindend. Mit Vorliebe verwandte man die Schwerkraft als kontrollierende Kraft. Es mag dies zum großen Teil seinen Grund darin gehabt haben, daß man nicht imstande war, einwandfreie Federn aus einem nicht magnetischen Material herzustellen. In der Tat sind die Versuche und Bemühungen, welche zur Herstellung guter, nicht-magnetischer Federn geführt haben, außerordentlich groß gewesen, und sie mehrten sich ganz besonders, sobald es notwendig war, den betreffenden Federn außer einer vorzüglichen elastischen Eigenschaft auch einen geringen Ohmschen Widerstand zu geben. Die Herstellung nicht-magnetischer Federn für Voltmeter, d. h. für solche Instrumente, die einen hohen OHMschen inneren Widerstand besitzen, ist heutigen Tages im allgemeinen mit geringen Schwierigkeiten verbunden. Anders verhält es sich für die Federn, welche in Millivoltmetern zur Verwendung kommen. Um für diese Instrumente eine möglichst hohe Voltempfindlichkeit zu erhalten, wird, wie bereits im Kapitel über Drehspulen bemerkt, die Wickelung der Drehspule so dimensioniert, daß der OHMsche Widerstand derselben möglichst niedrig wird. Es läßt sich mathematisch leicht nachweisen, daß die günstigsten Bedingungen für die Voltempfindlichkeit eines Drehspulensystemes dann vorhanden sind, wenn der Widerstand der Bewickelung derselben gleich ist dem sog. „toten" Widerstand der Federn und Zuleitungen. Daraus folgt ohne weiteres, daß zur Erreichung günstiger Verhältnisse der Widerstand der Spiralfedern ebenfalls ein niedriger sein muß. Wir bemerken daher in den Millivoltmetern der verschiedenen Konstruktionen Spiralfedern, die verhältnismäßig breit, dagegen nur dünn sind. Diese Dimensionierung der Federn macht dieselben für mechanische Verbiegungen sehr empfänglich, so daß derartige Instrumente die sehr unangenehme Eigenschaft der elastischen Nachwirkung der Spiralfedern zeigen. Diese elastische Nachwirkung ist erkennbar, sobald man ein solches Instrument längere Zeit mit großem Skalenausschlag eingeschaltet läßt und nach Unterbrechung des

Stromes beobachtet, inwieweit der Zeiger auf den Nullpunkt der Skala sofort zurückkehrt. Es wird sich dabei herausstellen, daß nach langdauernder Einschaltung kleine Abweichungen in der Nullpunktseinstellung eintreten. und daß diese erst nach geraumer Zeit vollständig verschwinden. Die Einwirkungen dieser elastischen Nachwirkung sind auf die allgemeine Genauigkeit des Apparates von komplizierter Natur, so daß in allen den Fällen. in welchen diese elastische Nachwirkung in großem Maße beobachtet wird. eine große Genauigkeit der Instrumente vollständig ausgeschlossen bleibt. In einer neuen Konstruktion von Instrumenten der Firma SIEMENS & HALSKE ist der Versuch gemacht worden, der Drehspule der Millivoltmeter einen verhältnismäßig hohen Widerstand zu geben (10 Ohm bei einer Empfindlichkeit von 45 Millivolt).

Unter der Annahme einer praktischen Grenze der Intensität des zur Verwendung kommenden magnetischen Feldes kann für ein Millivoltmeter mit hohem inneren Widerstand die hohe Voltempfindlichkeit nur durch die Verringerung der kontrollierenden Kraft erreicht werden. In der Tabelle 5 sind die Konstanten der alten und der neuen Ausführung des SIEMENSschen und WESTONschen Millivoltmeter zusammengestellt.

Tabelle 5.

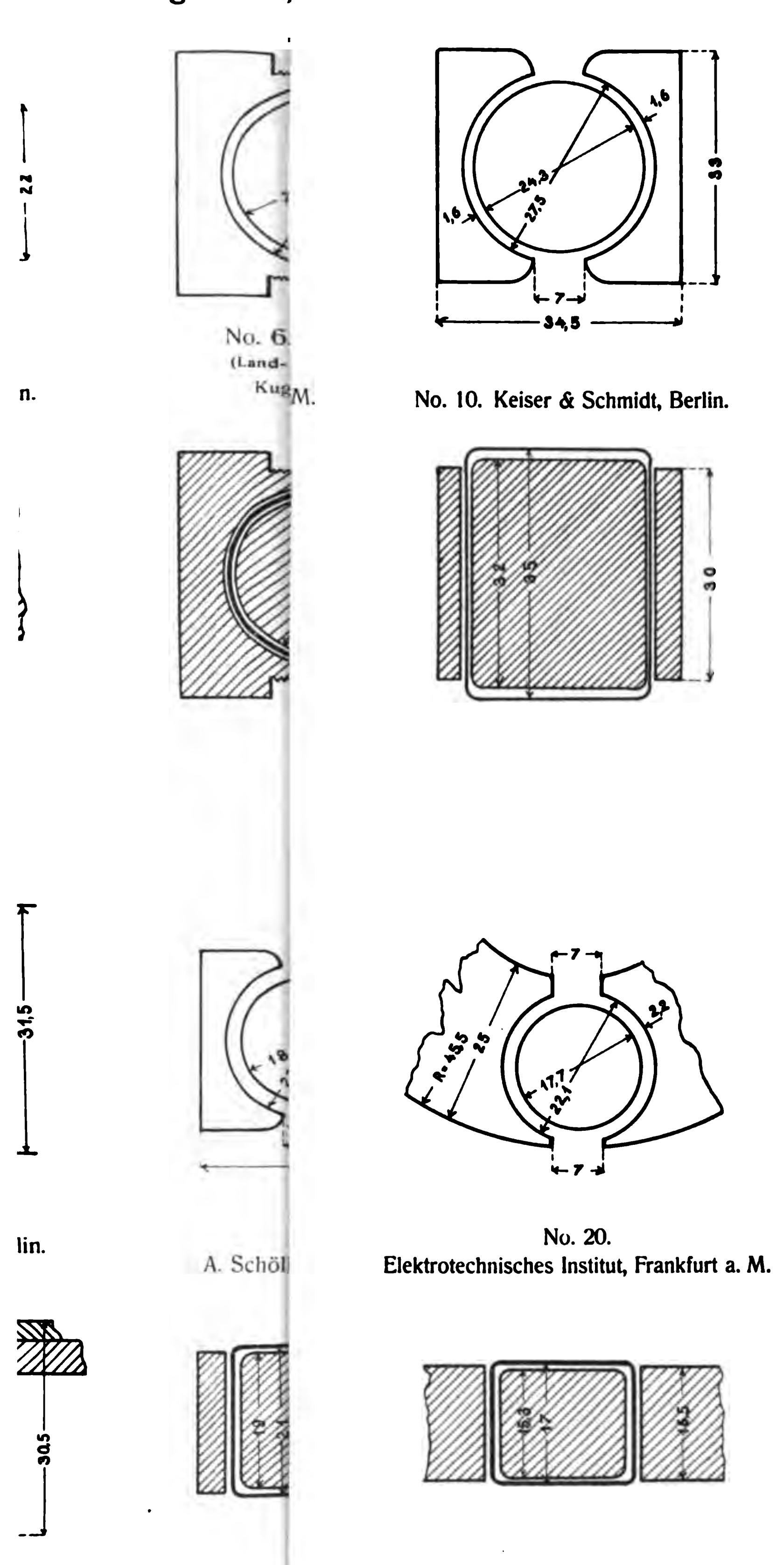
Tragbare Millivoltmeter von SIEMENS & HALSKE und der WESTON Co. aus verschiedenen Fabrikationsperioden.

		I	II	III	IV	V	VI
		Drehspule					
		Gewicht g	Federkraft k	k/g	Strom für vollen Ausschl.	Amperewindungen	III V
Siemens & Halske	1895—1906	10	0·70	0·07	0·075	1·39	0·05
„ „	1907	0·9	0.08	0·09	0·015	0·90	0·10
Weston	1888	10	1·00	0·10	0·050	1·35	0·08
„	1891	6·7	0·90	0·14	0·100	1·25	0·11
„	1893	3·7	0·40	0·11	0·030	0·40	0·28
„	1896	2·3	0·40	0·18	0.020	0·40	0·45
„	1903	2·0	0·40	0·20	0·030	0·25	0·80

Die Verbesserung der mechanischen Sicherheitskoeffizienten ist in der Neukonstruktion von SIEMENS & HALSKE unbedeutend, allerdings ist zugunsten der neuen Konstruktion anzunehmen, daß ein auf fein polierte Spitzen gesetztes Gewicht von 0·9 Gramm günstiger sein muß als ein solches von 10 Gramm, d. h. daß das leichtere System prinzipiell mechanisch widerstandsfähiger ausfallen wird.

Zu gleicher Zeit möchten jedoch auch diese Vergleichungen einen schlagenden Beweis dafür geben, wie ungemein schwierig es ist, in diesen Konstruktionen einen vollständig einwandfreien Kompromiß zwischen allen den zur Geltung kommenden und sich widersprechenden Faktoren zu schaffen.

:lle wichtiger Kon



n.

No. 6.
(Land-
KugM.

No. 10. Keiser & Schmidt, Berlin.

lin.

A. Schöl

No. 20.
Elektrotechnisches Institut, Frankfurt a. M.

Verlag von S. Hirzel-Leipzig.

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY

ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS.

Von den in der Tabelle 3 und 4 aufgeführten Fabrikaten sind bis auf Dimensionsverschiedenheiten und weniger wichtige Konstruktionsdetails die folgenden prinzipiell identisch mit der Originalkonstruktion von WESTON:

1, 2, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 und 16.

Die genauen Dimensionen der Polschuhe, des Kernes und der beweglichen Spule für das WESTON-Instrument sind in Fig. 35 abgebildet.

Die Nummern 18, 19, 20 unterscheiden sich in der Hauptsache dadurch, daß die Magnete in diesen dreien keine Polschuhe besitzen (Fig. 36 u. 37).

20. Meßsystem von Chauvin & Arnoux.

Die Anordnung des Instrumentes von CHAUVIN & ARNOUX, Paris (Fig 37), zeigt einen Magneten ohne Polschuhe mit einem kugelförmigen Eisenkern und ringförmiger Spule. Der außerordentlich große interpolare Luftzwischenraum, die Kürze des Magneten im Verhältnis zu diesem Luftzwischenraum und das außerordentlich große Gewicht der kleinen ringförmigen Spule geben ein beredtes Bei piel von einer Konstruktion wie sie nicht sein soll.

21. Meßsystem von Dr. R. Franke.

Originell und in der Konstruktion sorgfältig durchdacht ist das Kugelpolinstrument von Dr. R. FRANKE, jetzt von den Land- und Seekabelwerken, angefertigt (Fig. 38). Die sphärisch ausgehöhlten Polschuhe umschließen einen kugelförmigen Eisenkern bis auf eine kleine Zone. Die Ausnutzung des magnetischen Feldes ist bei dieser Konstruktion eine außerordentlich günstige. Die Drehspule ist ringförmig ausgebildet. Ein konstruktiver Nachteil dieser Anordnung möchte darin bestehen, daß magnetische Fremdkörper die in den interpolaren Zwischenraum eindringen, nur dadurch entfernt werden können, daß man das Polsystem des Instrumentes auseinanderschrauben muß. Bei den Instrumenten mit zylindrischen Polschuhen und zylindrischem Eisenkern lassen sich derartige Fremdkörper ohne Auseinandernahme des Instrumentensystemes leichter entfernen.

22. Meßsystem der Cie Volta.

Eine wesentlichere Abweichung von der WESTON-Form zeigt die von MEYLAN Fig. 39, ausgeführt von der C[IE] VOLTA, Paris und Fig. 40, ausgeführt von GAIFFE, Paris. In Fig. 39 erscheinen die Polschuhe als hornförmige Fortsetzungen des Magneten. Die Drehspule ist einseitig gelagert und die eine der Längsseiten derselben spielt in dem von den Polschuhen gebildeten zylindrischen Schlitz.

23. Meßsystem von Gaiffe.

In Fig. 40 sind die Pole der Magneten selbst direkt umgebogen, und nur der äußere Pol ist mit einem inneren Futter aus Weicheisen versehen, um auf diese Weise einen möglichst gleichförmigen interpolaren Zwischenraum zu erhalten. Auch hier ist die Drehspule naturgemäß einseitig gelagert.

Eine Verbesserung oder ein Vorteil in elektrischer Beziehung kann in diesen zwei Konstruktionen nicht erblickt werden, da von der Bewickelung der Drehspule nur etwa ein Drittel als aktiv zu betrachten ist, während der Rest totes Gewicht und Widerstand bildet. Um eine genügende Dämpfung der Drehspule zu erhalten, muß der Dämpfungsrahmen entsprechend kräftig gehalten werden. Außerdem ist mechanisch die einseitige Lagerung der Drehspule und die durch die notwendige Ausbalancierung derselben entstehende Erhöhung des Gesamtgewichts ungünstig.

II. Weicheiseninstrumente.

Die Instrumente dieser Type, die allgemein unter dem Namen „Weicheisen“- oder „elektromagnetische“ Instrumente bekannt sind, beruhen alle

auf dem Prinzip der Bewegung eines Stückchen weichen Eisens in dem von einem Solenoid erzeugten Magnetfelde. Wegen ihrer etwas robusten Bauart und ihrer Billigkeit haben diese Instrumente in der Technik eine große Verbreitung gefunden.

25. **Hysteresisfehler.** Außer den Fehlerquellen, die auf mechanische Ursachen zurückzuführen sind, und die mehr oder minder allen Instrumenten innewohnen, besitzen die Weicheiseninstrumente den Fehler der Hysteresis im Eisen, worin das charakteristische Unterscheidungsmerkmal gegenüber den Instrumenten mit Dauermagneten und Drehspule zu erblicken ist. Diese Hysteresis hat zunächst zur Folge, daß die Angaben des Instrumentes bei Gleichstrommessungen mit zunehmendem Strom geringer sind als mit abnehmendem, ferner auch, daß ein mit Gleichstrom geeichtes Instrument bei Wechselstrom im allgemeinen weniger anzeigt. Um diese Hysteresis auf ein Minimum zu reduzieren, ist es erforderlich, die Kraftlinien nur zu einem geringen Teil ihrer Länge durch Eisen zu schließen und ferner das Eisen so kurz wie möglich zu halten damit die entmagnetisierende Wirkung der Enden möglichst groß sei. Es ist klar, daß die Wirkung der Hysteresis kleiner wird, wenn das Eisen gesättigt ist, und daß dasselbe Ziel erreicht wird, wenn die Induktion im Eisen gering ist. Der Wahl einer zu kleinen Eisenmasse ist anderseits dadurch eine Grenze gesteckt, daß die wirksame Kraft und mithin die Empfindlichkeit des Instrumentes verringert wird.

26. **Einfluß der Kurvenform, Selbstinduktion und Frequenz.** Ein weiterer Nachteil des Weicheiseninstrumentes besteht bei Wechselstrommessungen darin, daß es bei gesättigtem Eisen den Mittelwert statt des Effektivwertes anzeigt. Nun hängt aber das Verhältnis des Mittelwertes zum Effektivwert von der Kurvenform ab, so daß ein Instrument, welches z. B. mit einem Sinusstrom geeicht ist, bei der Messung eines Stromes mit spitzer oder flacher Kurve fehlerhaft anzeigt. Bei denjenigen Systemen anderseits, die mit geringer Induktion im Eisen arbeiten, ist die wirksame Kraft proportional dem Quadrate des Stromes, mithin gibt das Instrument fast den Effektivwert unabhängig von der Kurvenform an.

Es wird oft angenommen, daß ein Instrument, dessen Angaben unabhängig von der Frequenz sind, auch von der Kurvenform des Wechselstromes unabhängig ist. Während dies nun bei Fehlern, die von der Selbstinduktion allein abhängen, zutrifft, ist es nicht mehr der Fall, wenn die Fehler vom Eisen herrühren. Jedes Instrument, dessen Angaben nicht mit dem Quadrate des Stromes zunehmen, gibt bei einer anderen Kurvenform als derjenigen, mit der es geeicht ist, ungenaue Angaben, bei dieser Kurvenform aber sind seine Angaben unabhängig von der Frequenz des Wechselstromes. (Benischke, ETZ. 1901.)

Wie bereits (Hdb. II, 1 in 25) erläutert, ist das Verhalten der Amperemeter und Voltmeter verschieden, je nachdem sie zu Gleichstrom- oder zu Wechselstrommessungen benutzt werden. Dies rührt davon her, daß die wirksame Kraft in erster Linie von der Amperewindungszahl der festen Spule abhängt. Bei den Amperemetern ruft nun das Hindurchschicken einer gewissen effektiven Stromstärke J dieselbe Anzahl von Amperewindungen hervor. Bei den Voltmetern ist dagegen der die Spule durchfließende Strom bei derselben effektiven Spannung $\tilde{E}$ durch den inneren Widerstand bedingt. Als solcher kommt bei Gleichstrommessungen der Ohmsche r, bei Wechselstrommessungen dagegen der scheinbare Widerstand (Impedanz) $\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}$, der durch die Selbstinduktion der Spule bedingt ist, in Betracht. Der die Spule durch-

fließende, die Amperewindungszahl ausmachende effektive Strom ist demzufolge für ein und dieselbe Spule

$$\text{bei Gleichstrom} \quad J = \frac{E}{r}$$

$$\text{bei Wechselstrom} \quad \tilde{J} = \frac{\tilde{E}}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}}$$

wobei L = Selbstinduktionskoeffizient der Spule, $\omega = 2\pi\nu$ (ν = Periodenzahl) = Winkelgeschwindigkeit des Wechselstromes. Als Widerstand r wurde hierbei derjenige der festen Spule allein bezeichnet. In den meisten Fällen erhalten jedoch die Voltmeter einen induktionsfreien Vorschaltwiderstand, wodurch die Abweichungen in den Angaben des Instrumentes bei Wechselstrom gegenüber denjenigen bei Gleichstrom vermindert werden, und zwar umsomehr, je mehr induktionsloser Widerstand für eine bestimmte Spannung vorgeschaltet werden kann, d. h. je größer die Empfindlichkeit des Voltmeters ist. Die Erhöhung der Empfindlichkeit kann entweder durch eine größere Anzahl Windungen auf der Spule geschehen, wodurch jedoch die Selbstinduktion derselben erhöht wird, oder aber durch Vergrößerung der wirksamen Eisenmasse, wodurch wieder die vorher erwähnten Nachteile erhöht werden.

Es muß auf alle Fälle ein Kompromiß getroffen, und der mittlere Weg gewählt werden. Man hilft sich nun in den meisten Fällen dadurch, daß man die Voltmeter mit 2 Skaleneinteilungen versieht, die eine für Gleich- die andere für Wechselstrom. Die oben angegebenen Umstände bringen es mit sich, daß diese Einteilungen zuweilen fast vollständig zusammenfallen. Praktisch sind diese Abweichungen durchaus nicht wesentlich im Vergleich zu dem immerhin geringen Genauigkeitsgrad, der sich mit Weicheiseninstrumenten überhaupt erreichen läßt, und welcher selten höher als 1 % des Sollwertes ist. Aus der Formel:

$$\tilde{J} = \frac{\tilde{E}}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}}$$

ist übrigens die — bereits oben erwähnte — Abhängigkeit der Angaben von der Periodenzahl ersichtlich.

Ein empfindlicher Nachteil der Weicheiseninstrumente besteht in vielen Fällen in der ungleichmäßigen Teilung der Skala, die in ihrem unteren Teil oft recht beschränkt ist. Diese folgt in Wirklichkeit einem quadratischen Gesetze (Hdb. II, 1 in 25) und wird nur durch künstliche Mittel etwas verbessert. Bei den meisten Konstruktionen beginnt die Skala überhaupt erst bei einem Zehntel des maximalem Meßbereiches, während der gleichmäßigere Teil derselben oft erst bei einem Fünftel des maximalen Skalenwertes anfängt.

Für den technischen Gebrauch der Apparate fällt dieser Nachteil hauptsächlich bei den Amperemetern ins Gewicht, da die Voltmeter in Zentralen nur für eine bestimmte Netzspannung benutzt werden. Das Meßbereich wird dann so gewählt, daß diese Netzspannung in den breiteren Teil der Skala fällt, und haben dann die Weicheisen-Voltmeter gegenüber den Drehspul-Voltmetern mit unterdrückter Nulllage den nicht zu unterschätzenden Vorteil, daß der Nullpunkt sichtbar und demnach jederzeit kontrollierbar ist.

27. Einfluß äußerer Magnetfelder.

Es ist bei Schalttafelinstrumenten die Frage von Wichtigkeit, inwiefern die benutzten Apparate von den umgebenden Magnetfeldern beeinflußt werden, da oft in der Nähe der Instrumente Starkstromschienen vorbeigeführt werden.

Diese Frage ist jedoch wegen der Mannigfaltigkeit der vorhandenen Felder und der örtlichen Verhältnisse von vornherein schwierig zu lösen (siehe oben 5). Sicher ist, daß diejenigen Instrumente am wenigsten beeinflußt werden, deren innere wirksame Kraft am größten ist. Ein verhältnismäßig wirksamer Schutz der Instrumente gegen äußere Felder besteht darin, daß man dieselben in einem Eisengehäuse einbaut; dadurch wird jedoch die Empfindlichkeit des Instrumentes etwas beeinflußt. Es wird von den örtlichen Verhältnissen einerseits, anderseits von den Ansprüchen, die man an den Apparat stellt, abhängen, welches von den beiden Übeln in Kauf zu nehmen ist. Die Beeinflussung des Instrumentes hängt zum großen Teil von der Lage der Starkstromschienen ab; bei solchen mit horizontaler Spulenachse ist die Beeinflussung am größten, wenn die Schienen oberhalb und unterhalb des Instrumentes laufen, während bei denjenigen mit vertikaler Spulenachse diese Beeinflussung am stärksten hervortritt, wenn die Schiene direkt hinter dem Instrumente läuft. Es empfiehlt sich, die Plus- und Minusschiene auf der Schalttafel einander so nahe wie möglich zu montieren und die Zuleitungen zum Instrumente dicht nebeneinander zu führen.

Als Gegenkraft wird bei den Instrumenten dieser Type fast durchgängig das Drehmoment eines Gewichts benutzt, welches an einem auf der Achse befestigten Arme angebracht wird. Um die Ungleichmäßigkeit der Skaleneinteilung nach Möglichkeit zu korrigieren wird oft die Anordnung auch so getroffen, daß das die Gegenkraft liefernde Gewicht auf zwei im bestimmten Winkel zueinander stehende Arme verteilt wird. Das Bestreben geht dahin, die Gegenkraft im ersten Teil der Skala möglichst groß und gegen den Endausschlag möglichst gering zu gestalten. Es spricht zugunsten der Instrumente dieser Ausführungsart gegenüber dem Deprez-System, daß hier die Spiralfedern, die infolge ihrer elastischen Nachwirkungen oft Nullpunktsänderungen verursachen, in Wegfall kommen. Weniger wesentlich ist dagegen das Fortbleiben des Dauermagneten und mithin die Unabhängigkeit der Angaben des Weicheiseninstrumentes von der Konstanz eines solchen, nachdem es heute gelungen ist, Magnete mit praktisch vollkommen konstanter Feldstärke herzustellen (siehe oben 14). Durch ihre robuste Bauart, ihre Überlastungsfähigkeit und vorzugsweise ihre Billigkeit haben sich die Weicheiseninstrumente überall da, wo auf große Empfindlichkeit und Genauigkeit kein besonderes Gewicht gelegt wird, eine große Verbreitung als Schalttafelinstrumente erobert.

Die meisten Ausführungsmöglichkeiten sind von Kittler (Elektrotechnik Bd. I) ausführlich behandelt worden. Im Folgenden sollen die heute in der Praxis gebräuchlichsten Konstruktionen beschrieben werden.

28. Weicheiseninstrumente von S. & H.

Die Konstruktion der Weicheiseninstrumente von Siemens & Halske wird in Fig. 41 veranschaulicht. In einer länglich angeordneten Drahtrolle α, deren innerer Luftraum einen Spalt bildet, bewegt sich ein eigentümlich geformtes, annähernd ovales Eisenscheibchen s (Fig. 41 a), dessen exzentrische Drehachse senkrecht zur Ebene des Scheibchens steht. Die Form dieses Eisenkerns ähnelt übrigens einer von Uppenborn im Jahre 1881 angegebenen. Der Eisenkern sitzt mit den Dämpfungs- und Balancierungseinrichtungen auf einer Stahlachse, welche in Steinen spielt. Die Spule ist von einem „magnetischen Schirm“ aus weichem Eisenblech umgeben, der Schutz gegen Beeinflussung der Angaben des Instrumentes durch in der Nähe fließende starke Ströme bieten soll. Diese Weicheiseninstrumente werden mit derselben Luft-

dämpfung versehen, die von der Firma bei den elektrodynamometrischen Instrumenten verwandt wird. Der Luftraum zwischen Dämpferplatte D und Dämpferrohr T beträgt bei dieser Konstruktion etwa $^1/_2$ mm. Die Ausführung des Systems bei Voltmetern und Amperemetern ist in den wesentlichen Teilen dieselbe. Die Hysteresisfehler dieser Instrumente sind gering. Die Amperewindungszahl bei vollem Skalenausschlag beträgt im Mittel ca. 250. Der Wattverbrauch im Voltmeter im Mittel ca. 6 bis 10 Watt.

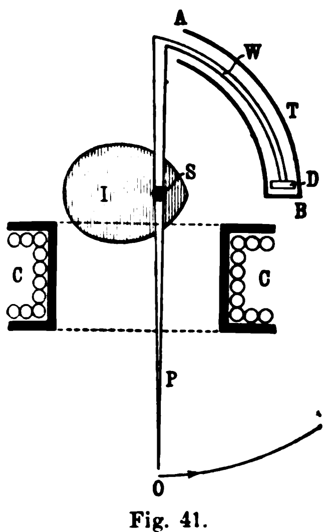


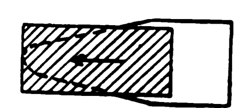
Fig. 41.



Fig. 41 a.

29. Weicheisen-Instrumente von H. & B

Die Konstruktion der elektromagnetischen Instrumente von Hartmann & Braun besteht in einer fest angeordneten Spule mit vertikaler Windungsebene, in deren Hohlraum ein konzentrisches Zylindermantelsegment aus weichem Eisen mit einer in Steinen gelagerten Achse drehbar angeordnet ist. Die Drehungsachse fällt bei diesen Instrumenten mit der Achse der Spule zusammen. Das Blechstück befindet sich nahe der Innenwand der Spule und hiermit deckt sich nahezu ein mit geringem Spielraum fest angeordnetes ähn-



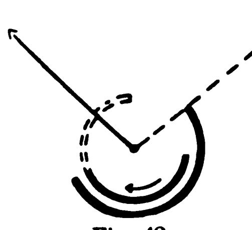




Fig. 42.



Fig. 43.

liches Weicheisenstück (Fig. 42). Von der stromdurchflossenen Spule im gleichen Sinne polarisiert, wirkt das letztere auf das bewegliche Bogenstück abstoßend und erteilt diesem ein von der Stromstärke abhängiges Drehmoment. Als Gegen-

kraft dient auch bei diesem Instrument die Schwere. Fig. 43 zeigt das System mit aus dem Solenoid herausgezogenen Weicheisenteilen. Die Dämpfung besteht aus einem Z-förmigen Flügel, der mit geringem Spielraum in einer allseits geschlossenen bogenförmigen Kammer schwingt; diese enthält nur einen schmalen Schlitz als Durchlaß für den Dämpferflügelarm.

30. Weicheiseninstrumente von Lord Kelvin.

Wohl die einfachste Form der elektromagnetischen Anordnung ist diejenige von Lord KELVIN (Fig. 44), bei welcher ein Eisenstab J in die Spule C hineingezogen wird. Diese hin- und hergehende Bewegung wird durch das Rähmchen F, welches in den Ösen K beweglich hängt, in eine drehende Bewegung umgewandelt; am Rähmchen ist auch der Zeiger P befestigt. Das an einem Arm hängende Gewicht B dient zur Ausbalancierung des Systems.

31. Weicheiseninstrumente der A.E.G.

Die Weicheiseninstrumente der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft (Konstruktion von DOLIVO-DOBROWOLSKY) besitzen als beweglichen Eisenteil ein senkrecht aufgehängtes Bündel aus einigen dünnen

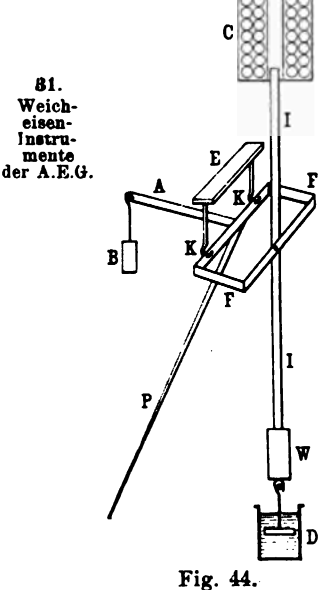


Fig. 44.

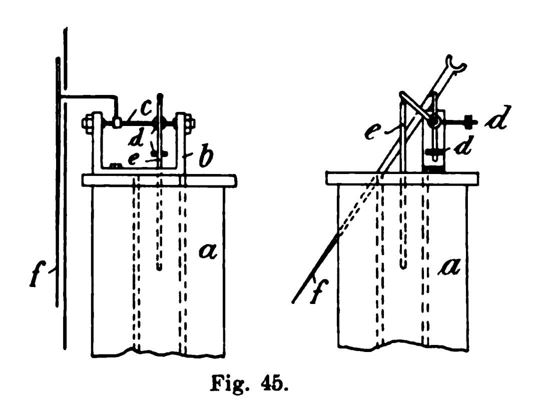


Fig. 45.

Eisendrähtchen. Die feste Spule a trägt einen kleinen Messingbock b, in welchem eine Achse c zwischen Schrauben gelagert ist (Fig. 45). Auf der Achse sitzen zwei Hebelarme zur Aufnahme der Reguliergewichte d. Ferner trägt die Achse an einem dritten Hebelarme den Eisenkern e und endlich den Zeiger f, welcher vor der Skala g spielt. Durch größere oder geringere Länge des Eisenkernes, sowie durch mehr oder minder tiefe Anfangslage desselben gegen die Spule läßt sich die Form der Skala so verändern, daß sie entweder an einer bestimmten Gebrauchsstelle möglichst große Intervalle oder über das ganze Gebiet möglichste Proportionalität mit der Stromstärke erhält.

Neuerdings stellt die Gesellschaft eine neue Form von elektromagnetischen Meßgeräten her, welche der soeben beschriebenen, älteren Bauart gegenüber vor allem den Vorzug besitzt, daß der schwingende Teil mit einer Luftdämpfung ausgerüstet ist. Das System selbst ist auch insofern abgeändert, als jetzt ein feststehendes und ein bewegliches aus dünnem Eisenblech hergestelltes Zylindermantelsegment verwendet wird.

32. Weicheiseninstrumente von Everett Edgc[illegible]

EVERETT, EDGCOMBE & Co. verwenden eine Spule, deren Hohlraum die Form eines Halbkugelsegments besitzt, in welches das nierenförmige drehbare Eisenblech NN^1 hineingezogen wird. Auf der Achse des Eisenbleches [illegible]blich, der Zeiger befestigt, der den Dämpfungsflügel V trägt (Fig. 46).

33. Weicheisen-Instrumente von Evershed & Vignoles.

Bei den Evershedschen Weicheiseninstrumenten (Fig. 47) ist sowohl das feste HMKA wie auch das bewegliche Eisenblech N entsprechend dem Spulenhohlraum gebogen. Das feste Blech hat zwei einander gegenüberstehende Zungen HA, über welche das bewegliche Blech N sich zu stellen sucht. Zur Äquilibrierung des Systems werden auch hier Gegengewichte b benutzt.

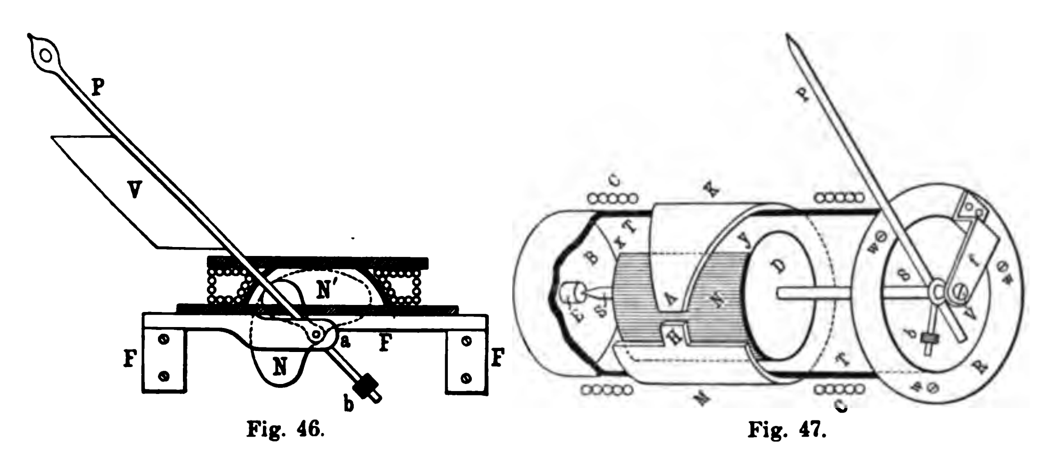


Fig. 46. Fig. 47.

34. Weicheisen-Instrumente von Dr. P. Meyer A.-G.

Dr. Paul Meyer A.-G. baut außer Weicheiseninstrumenten nach Hummelschem Prinzip neuerdings auch solche, deren Einrichtung Fig. 48 in den wesentlichen Teilen wiedergibt. In dem Hohlraum der Drahtspule befindet sich ein fester Eisenkern und das bewegliche System, welches den Zeiger trägt. Die Achse des Systems ist exzentrisch zur Spulenachse angeordnet; eine Verlängerung des Zeigers nach der anderen Seite der Drehachse trägt den Dämpfungsflügel, der in einem fast ganz geschlossenen, bogenförmig gestalteten Blechkästchen schwingt. Die Amperewindungszahl beträgt ca. 300; der Stromverbrauch der Voltmeter ca. 0·6 bis 0·8 Amp. bei vollem Skalenausschlag.

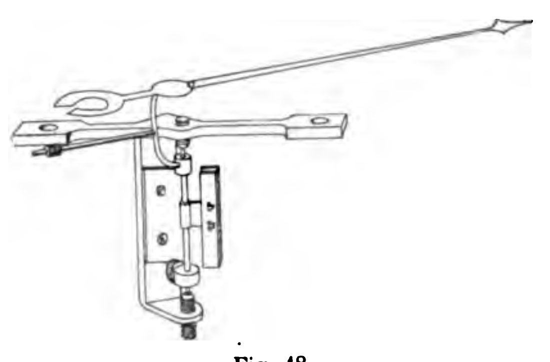


Fig. 48.

III. Elektrodyanmische Instrumente.

35. Empfindlichkeit und Skalencharakter.

Die elektrodynamischen Meßinstrumente beruhen auf der Einwirkung eines festen von Strom durchflossenen Solenoids auf eine bewegliche, gleichfalls von Strom durchflossene Spule. Dieses Meßsystem kann sowohl für Gleich- wie auch für Wechselstrommessungen benutzt werden, worin das charakteristische Unterschiedsmerkmal gegenüber dem Weston-Typus zu erblicken ist. Ein weiterer Unterschied liegt in der geringeren Empfindlichkeit der elektrodynamischen Meßgeräte, die dadurch begründet ist, daß das von der festen

Spule erzeugte Feld natürlich nicht so kräftig sein kann, wie dasjenige eines aus bestem Stahl erzeugten permanenten Magneten. Diese Empfindlichkeit hängt direkt von der Amperewindungszahl der Spulen ab, doch ist die Erhöhung derselben begrenzt einerseits durch konstruktive Schwierigkeiten, zumal bei Starkströmen, andererseits durch die bei Erhöhung der Windungszahl zunehmende Selbstinduktion des Instrumentes. Diese Selbstinduktion hat bei Voltmetern und Wattmetern zur Folge, daß der die bewegliche Spule durchfließende Strom durch die vergrößerte Impedanz einerseits in seinem Effektivwerte verringert, andererseits in seiner Phase gegen die zu messende Effektivspannung verschoben wird.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied gegenüber den Instrumenten mit permanentem Magneten liegt in der ungleichmäßigen Teilung der Skala bei den elektrodynamischen Meßgeräten d. h. darin, daß die wirksame Kraft, mithin die Drehung der beweglichen Spule, nicht proportional der Stromzunahme ist. Die elektrodynamischen Instrumente messen das Produkt aus den Strömen beider Spulen und bei den Leistungsmessern, wo der eine Strom der Spannung proportional ist, das Produkt aus Strom und Spannung (Hdb. II 1 in 26). Die ablenkende Kraft der festen auf die bewegliche Spule ist diesem Faktor $e \cdot i$ direkt proportional und ferner proportional einer Funktion des Ausschlagswinkels α selbst, verursacht durch die verschiedene Lage, die die beiden Spulen zueinander entsprechend dem Betrage $e\, i$ haben.[1] Die ablenkende Kraft ist demzufolge

$$K = e \cdot i\, f(\alpha)$$

oder, da der Strom i' in der beweglichen Spule seinerseits der Spannung proportional ist:

$$K = i \cdot i'\, f(\alpha).$$

Als Gegenkraft wird auch hier wie bei den Deprez-Instrumenten die Spannung von Spiralfedern benutzt. Diese Federspannung nimmt mit wachsendem Ausschlage zu, ist also dem Winkel α proportional. In jedem Augenblick halten sich die beiden Kräfte das Gegengewicht, also:

$$i \cdot i'\, f(\alpha) = c\, \alpha.$$

Soll der Ausschlag α dem Produkte $i \cdot i'$ proportional sein, so muß $f(\alpha)$ eine Konstante werden d. h. die ablenkende Kraft K muß von der relativen Lage der beweglichen Spule zur festen unabhängig sein. Dies kann bei Wattmetern durch passende Anordnung der festen Spule erreicht werden. (Siehe weiter unten.) Anders liegen die Verhältnisse bei Voltmetern und Amperemetern. Bei ersteren sowohl wie auch bei Amperemetern für geringe Strommeßbereiche durchfließt derselbe Strom sowohl die bewegliche wie auch die feste Spule; bei Amperemetern zur Messung stärkerer Ströme wird ein Teil des Stromes zur beweglichen Spule abgezweigt. In allen diesen Fällen ist

$$K = i^2\, f(\alpha) = c\, \alpha$$

der Ausschlag also proportinal dem Quadrate des Stromes.

36. Einfluß der Frequenz und Selbstinduktion.

Bei den elektrodynamischen Voltmetern, bei denen die beiden Spulen in Serie geschaltet sind, wird natürlich in beiden Spulen Strom von derselben Phase fließen; die Angaben des Instrumentes sind somit unabhängig von der Frequenz des Wechselstromes. Bei den Amperemetern dagegen, bei

[1]) E.T.Z. 1899, Heft 37

denen die bewegliche Spule abgezweigt wird, ist es erforderlich, daß die Zeitkonstanten beider Spulen möglichst gleich sind, wenn die Phase des abgezweigten Stromes nicht gegen die Phase des zu messenden Hauptstromes verschoben werden soll. Dies ist auch bei den bisher bekannt gewordenen Konstruktionen tatsächlich der Fall. Aus diesem Grunde ist der Einfluß der Wirbelströme infolge etwaiger im Instrument befindlicher Metallteile auf die Angaben der Voltmeter und auch der Amperemeter im Gegensatz zu den Wattmetern nur gering. Bei letzteren müssen Metallteile im Innern des Instrumentes möglichst vermieden werden, da die in denselben erzeugten Wirbelströme erhebliche Fehler in den Angaben besonders dann verursachen, wenn eine große Phasenverschiebung zwischen den Strömen in der feststehenden Starkstromspule und der beweglichen Schwachstromspule stattfindet.

Bei den Volt- und Wattmetern muß ferner noch die Selbstinduktion dieser Instrumente berücksichtigt werden. Während bei Gleichstrommessungen für den das Meßgerät durchfließenden Strom lediglich der Ohmsche Widerstand r des Systems in Betracht kommt, muß bei Wechselstrom die Impedanz

$$\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}$$

in Rechnung gezogen werden. Theoretisch sind also auch die Meßinstrumente dieser Type von der Frequenz des Wechselstromes abhängig, dies umsomehr, je unempfindlicher das Instrument ist, je geringer also der innere Widerstand r für eine bestimmte Spannung ist. Praktisch fällt jedoch bei den meisten bisher bekannten Konstruktionen der durch die Selbstinduktion verursachte Fehler nicht ins Gewicht, da in dem inneren Widerstand r auch ein induktionsloser Vorschaltwiderstand einbegriffen ist, der ein vielfaches des induktiven Spulenwiderstandes beträgt und somit den prozentualen Fehler entsprechend vermindert.

Wie aus der Formel $K = f(\alpha)\, i \cdot i'$ ersichtlich, sind die elektrodynamischen Voltmeter, wie schon oben bemerkt, sowohl für Gleich- als auch für Wechselstrom verwendbar. Dies ist als besonderer Vorteil dieser Type zu bezeichnen mit Rücksicht darauf, daß die Eichung derselben mit Gleichstrom vorgenommen werden kann, für dessen Messung man in der Meßtechnik über präzise Mittel verfügt und stets den Kompensationsapparat zur Kontrolle heranziehen kann. Hierbei ist jedoch der Einfluß des Erdfeldes in Rücksicht zu ziehen. Dieser Einfluß ist um so größer, je kleiner das von den Spulen erzeugte Feld im Verhältnis zum erdmagnetischen ist. Man kann diese Beeinflussung aufheben, indem man die Ebene des festen Feldes in den magnetischen Meridian legt, oder aber indem man zwei Ablesungen mit gewendetem Strom macht und das Mittel beider nimmt (siehe oben in 5). Letztere Methode wird allgemein bei der Eichung dieser Apparate angewandt.

In der Tabelle 6 sind für die markantesten Konstruktionen diejenigen Faktoren zusammengestellt, deren richtige Wahl die Zweckmäßigkeit eines elektrodynamischen Meßgeräts bedingt. Die Bewertung der einzelnen Größen kann nach denselben Gesichtspunkten, wie bereits in den vorstehenden Kapiteln für den Weston-Typus dargelegt, erfolgen; es erübrigt sich demnach, an dieser Stelle auf dieselbe näher einzugehen.

Tabelle 6.

Konstanten einiger elektrodynamischer Instrumente.

a) Amperemeter.

		Feldspule		Drehspule				
		Amperewindungen	Spannungsverlust für vollen Ausschlag Volt	Gewicht gr [1])	Federkraft cm.gr	Widerstand Ohm [2])	Windungszahl	Strom für vollen Ausschlag Amp
Hartm. & Braun	(1 Amp.)	ca. 180	ca. 1·3	ca. 4	ca. 0·38	ca. 18	ca. 200	ca. [illegible]
do.	(5 Amp.)	„ 300	„ 0·5	„ 4	„ 0·38	„ 18	„ 200	„ [illegible]
Siemens & Halske	(5 Amp.)	„ 300	„ 2·5	„ 9	„ 0·4	„ 1.7	„ 40	„ [illegible]
Weston	(1 Amp.)	„ 130	„ 1·0	„ 5	„ 0·3	„ 4	„ 90	„ [illegible]
do.	(5 Amp.)	„ 240	„ 0·75	„ 5	„ 0·4	„ 1·5	„ 45	„ [illegible]

b) Voltmeter.[3])

	Feldspule			Drehspule					
	Windungszahl	Widerstand Ohm	Selbstinduktion Henry	Gewicht gr [1])	Federkraft cm.gr	Widerstand Ohm	Windungszahl	Strom für vollen Ausschlag Amp	Selbstinduktion Henry
Hartm. & Braun	ca. 1800	ca. 130	ca. 0·029	ca. 4	ca. 0·4	ca. 120	ca. 400	ca. 0·06	ca. [illegible]
Siemens & Halske	„ 1000	„ 45	„ 0·04	„ 9	„ 0·4	„ 35	„ 300	„ 0·10	„ [illegible]
Weston	„ 2000	„ 100	„ 0·03	„ 3·2	„ 0·3	„ 50	„ 280	„ 0·05	„ [illegible]

c) Wattmeter.

			Feldspule		Drehspule					
			Amperewindungen Mittel	Wattverbrauch	Gewicht gr [1])	Federkraft cm.gr	Windungszahl	Strom für vollen Ausschlag Amp.	Widerstand Ohm	Selbstinduktion Henry
Hartmann & Braun		1907	ca. 400	ca. 4	ca. 4·5	ca. 0·38	ca. 400	ca. 0·03	ca. 100	ca. [illegible]
Siemens & Halske	bis	1906	„ 400	„ 6	„ 9	„ 0·7	„ 400	„ 0·03	„ 100	„ [illegible]
do.	von	1907	„ 400	„ 4	„ 3	„ 0·4	„ 300	„ 0·03	„ 100	„ [illegible]
Weston	bis	1906	„ 240	„ 4	„ 3·5	„ 0·3	„ 280	„ 0·05	„ 45	„ [illegible]
do.	von	1907	„ 200	„ 2	„ 3	„ 0·5	„ 210	„ 0·05	„ 35	„ [illegible]

a) Amperemeter.

Die Schwierigkeit in der Konstruktion der elektrodynamischen Amperemeter besteht darin, daß man nicht immer beide Spulen hintereinander schalten kann, da die schwache Wickelung der beweglichen Spule und insbesondere die dünnen Federn, die derselben den Strom zuführen, nicht belastet werden können. Die Serienschaltung kann demzufolge nur für geringe Strommeßbereiche zur Anwendung kommen. Für stärkere Ströme wird die bewegliche Spule in Parallelschaltung zum Hauptstromkreise verwendet und erhält analog den Weston-Millivoltmetern einen Strom, der proportional ist dem Spannungsabfall, den der zu messende Hauptstrom in einem Widerstand oder in der festen Spule erzeugt. Bei dieser Schaltungsweise ist jedoch zu

[1]) Gewicht einschl. Zeiger, Federn und Dämpfer.

[2]) Widerstand einschl. des der Drehspule vorgeschalteten.

[3]) Die Instrumente von H. & B. und S. & H. haben für verschiedene Meßbereiche verschiedene Wickelungen. Zum Zwecke der besseren Vergleichung sind Instrumente für 150 Volt angeführt.

berücksichtigen, daß einerseits infolge der verschiedenen Selbstinduktion der beweglichen und festen Spule die Phase des Abzweigstromes gegenüber derjenigen des Hauptstromes verschoben werden kann, wodurch natürlich Störungen in den Angaben des Amperemeters eintreten können. Andererseits treten, da beide Spulenwickelungen naturgemäß aus Kupfer bestehen, bei verschiedenen Temperaturen falsche Stromverzweigungen ein, die durch den Temperaturkoeffizienten des Kupfers bedingt sind. Um diese Fehler zu beheben, bringen SIEMENS & HALSKE sowohl im Hauptstromkreise wie im Nebenschlusse Vorschaltwiderstände an, die aus temperaturfehlerfreiem Material bestehen. Durch diese wird sowohl der Temperaturkoeffizient wie auch die Phasenverschiebung zum Teil herabgedrückt. Die Schaltung zeigt Fig. 49. Die

37. Elektrodynamische Amperemeter von S. & H.

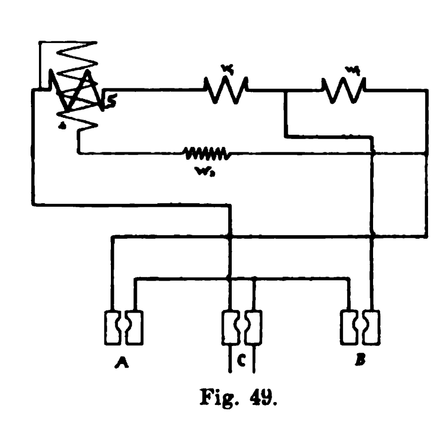
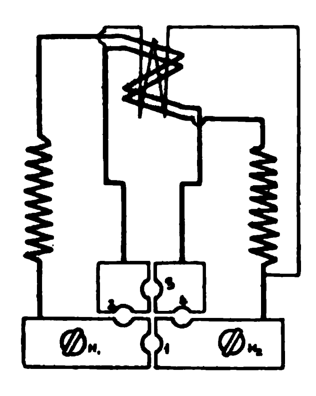


Fig. 49.


Fig. 50.

bewegliche Spule ist mit s, die feste mit S bezeichnet. W_1 und W_2 sind Vorschaltwiderstände im Hauptstromkreise, W_3 im Nebenschlußkreise. Der Strom tritt bei C ein resp. aus und durchfließt außer der festen Spule den Widerstand W_1 oder W_1 und W_2, je nachdem der Stöpsel bei B oder A gesteckt ist. Die erstere Schaltung wird zur Messung des größeren Strombereiches verwendet.

Durch diese Schaltungsweise wird ein verhältnismäßig hoher Eigenkonsum des Instrumentes in Kauf genommen. Das tragbare Amperemeter von S. & H. verbraucht in der Tat etwa 40 Watt beim maximalen Skalenausschlag.

Die Konstruktion des Meßsystems an sich ist derjenigen des SIEMENSschen Wattmeters ähnlich und aus Fig. 59 ersichtlich. (Beschreibung weiter unten.)

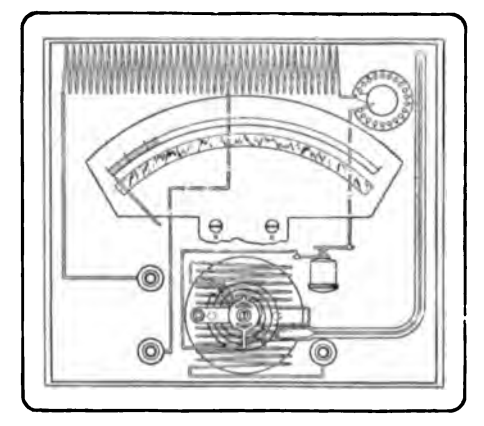
38. Elektrodynamische Amperemeter der A.E.G.

In etwas veränderter Schaltung, jedoch auf demselben Prinzip der Parallelschaltung beider Spulen fußend, verwendet die **Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft** das von ihr gebaute elektrodynamische Amperemeter, dessen konstruktive Details im übrigen dieselben sind, wie diejenigen der Wattmeter dieser Firma (Seite 57). Wie aus Fig. 50 ersichtlich, werden, wenn der Stöpsel in 3 gesteckt ist, sowohl die festen Spulen, wie auch die 2 Vorschaltwiderstände W_1 W_2 (Meßwiderstände) in Serie geschaltet; wird dagegen 2 und 4 gleichzeitig gestöpselt, so sind die Spulen in Parallelschaltung, während die bewegliche Spule über einen dieser Widerstände und einer festen Spule abgezweigt ist. Der Anschluß des Stromes geschieht bei H_1 H_2.

b) Voltmeter.

89. Elektrodynamisches Voltmeter der Weston-Co.

Der Grundgedanke, von dem WESTON bei der Konstruktion dieses Voltmeters ausging, war, das bis dahin durchweg benutzte WEBERsche Elektrodynamometer den Bedürfnissen der Technik zugänglich zu machen. Zu diesem Behufe war es zunächst erforderlich, die umständliche und zeitraubende Aufstellung des Dynamometers mittels Stellschrauben zu vermeiden und das Instrument direkt anzeigend zu gestalten. Dieses wurde durch die in Fig. 51 angegebene Anordnung erreicht. Die das Kraftfeld erzeugende feste Kupferspule besteht hier aus zwei in Serie geschalteten Hälften, in deren Mitte die aus Aluminiumdraht gebildete bewegliche Spule angeordnet ist. Beide Spulen sind rund. Der beweglichen Spule wird der Strom, wie



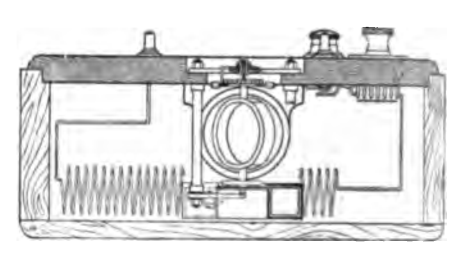


Fig. 51.

üblich, vermittels zweier Spiralfedern aus antimagnetischem Material zugeführt. In der Nulllage stehen die Spulenebenen in einem Winkel von 30° bis 40° zueinander, während der volle Skalenausschlag einen Winkel von ca. 85° bis 90° umfaßt. Zur Vermeidung von Wirbelströmen sind Eisenteile wie auch größere zusammenhängende Metallteile vermieden. Aus demselben Grunde ist die bewegliche Spule nicht wie bei den reinen Gleichstrominstrumenten auf einen Rahmen, sondern frei gewickelt. Die Empfindlichkeit des Voltmeters beträgt 0·05 Ampere für den vollen Skalenausschlag; hierbei beträgt der Widerstand der festen und beweglichen Spulen zusammen ca. 100 Ohm.

Bemerkenswert ist eine Vorrichtung zur Korrektion des Temperatureinflusses; diese besteht aus einem kleinen aus temperaturfehlerfreiem Material hergestellten Rheostaten, der in Fig. 51 oben rechts ersichtlich ist. Die Kontakte dieses Regulierwiderstandes sind in Temperaturgraden bezeichnet, entsprechend den Angaben eines ins Innere des Systems reichenden Thermometers. Das Voltmeter wird nur in der Mittelstellung des Reglers geeicht; bei zu- resp. abnehmender Temperatur wird Widerstand ab- resp. zugeschaltet, dessen Betrag der Widerstandsveränderung der Spulen entspricht. Bei der Messung ist dann der Hebel des Reglers auf denjenigen Kontaktknopf zu stellen, der mit den Angaben des Thermometers übereinstimmt. Wie bereits bei der Besprechung der elektrodynamischen Typen hervorgehoben, wird auch bei diesem Voltmeter die Selbstinduktion der Solenoide durch den bei höheren Spannungsmeßbereichen vorgeschalteten großen induktionsfreien

Widerstand wesentlich herabgedrückt. Der Selbstinduktionsfehler beträgt z. B. bei einem maximalen Meßbereich von 120 Volt und 50 Perioden per Sekunde ca. 0·04 %.

40. Elektrodynamisches Voltmeter von S. & H.

Die Konstruktion des Siemensschen Spannungsmessers ist in seinen wesentlichen Teilen aus Fig. 52 ersichtlich. Die Kupferspulen besitzen einen Widerstand von ca. 75 Ohm und die Empfindlichkeit des Instrumentes beträgt etwa 0·1 Amp. für den vollen Skalenausschlag. Dem Voltmeter für 75 Volt z. B. kann demzufolge ein Manganinwiderstand vorgeschaltet werden, der etwa das Zehnfache des Kupferwiderstandes beträgt; der Temperaturkoeffizient des Spannungsmessers wird mithin auf etwa $^1/_{10}$ desjenigen des Kupfers herabgedrückt. Der Selbstinduktionskoeffizient der Solenoide ist ungef. 0·05 Henry; mithin weicht der scheinbare von dem Ohmschen Widerstand bei einem Voltmeter für 75 Volt mit einem Gesamtwiderstand von 750 bis 800 Ohm und bei einer Periodenzahl von 100 Perioden pro Sekunde um weniger als etwa $^1/_{10}$ % ab.



Fig. 52.

Die aus zwei in Serie geschalteten Hälften bestehende feste Spule wie auch die bewegliche Spule haben hier rechteckige Form. Erstere ist auf Messingrahmen gewickelt, die an zwei Stellen geschlitzt sind. Die der beweglichen Spule den Strom zu- und abführenden Spiralfedern sind an der oberen Seite der Drehachse angebracht, während an der unteren Seite die in der Fig. 52 ersichtliche in **10** beschriebene Luftdämpfung angeordnet ist. Die festen Spulen sind auf einer Messingplatte montiert und auf beiden Seiten durch zwei Böcke aus Messingguß gestützt.

41. Elektrodynamisches Voltmeter der A.E.G.

Während bei den bisher beschriebenen elektrodynamischen Meßgeräten sorgsam vermieden worden ist, Eisenteile oder sonstige zusammenhängende Metallteile ins Instrument hineinzubringen, besitzen die auf demselben Prinzip beruhenden Instrumente der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft eine magnetische Dämpfung und einen Eisenkörper zur Verstärkung des von der festen Spule erzeugten Feldes. Die für Voltmeter, Wattmeter und Amperemeter ähnlich durchgeführte Konstruktion ist aus Fig. 53 ersichtlich. In einem aus Eisenblech zusammengesetzten Körper *EE*, welcher eine von Kreisbögen begrenzte Bohrung besitzt, ist die aus 2 Teilen bestehende feste Spule eingesetzt. Innerhalb dieser befindet sich an der Achse *A* die bewegliche Spule *B*, welcher der Strom durch die Spiralfedern *S*, die wie üblich als Gegenkraft dienen, zugeführt wird. Auf der Achse sitzt außer dem Zeiger *Z* ein Aluminiumdoppelflügel *R*, dessen äußerer Rand sich zwischen den Polen der beiden Dämpfungsmagnete *D* bewegt und die Schwingungen des drehbaren Systems dämpft. Den Verlauf der von der festen Spule erzeugten Kraftlinien stellen die gestrichelten Linien in Fig. 53 dar. Wie man daraus ersieht, ist der

Eisenkörper E in bezug auf die festen Spulen so gestaltet, daß er die Kraftlinien in sich aufnimmt und ihren Verlauf so bestimmt, daß die Dämpfmagnete D von ihnen nicht getroffen werden. Der innere Teil des Instrumentes, in welchem sich die drehbare Spule bewegt, ist frei von Eisen. Es ist also gewissermaßen nur der Rückweg der Kraftlinien durch Eisen geschlossen.

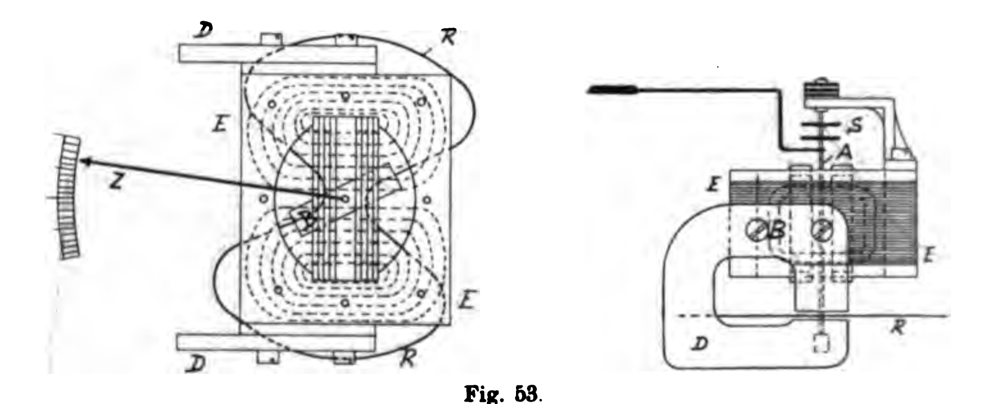


Fig. 53.

Der Kupferwiderstand der festen und beweglichen Spulen beträgt beim Voltmeter ca. 130 Ohm und die Empfindlichkeit für vollen Ausschlag ca. 0·06 Amp.

c) Wattmeter.

Über Theorie des Wattmeters und der Korrektion infolge der Phasenverschiebung in der beweglichen Spule siehe Hdb. II, 4 in 68 u. f. Ebendort sind die anzubringenden Korrekturen für den Eigenkonsum des Wattmeters bei den verschiedenen Schaltungen angegeben. Diese letztere Korrektion ist um so größer, je unempfindlicher das Wattmeter ist, d. h. je größer der Spannungsverlust in der festen Spule bzw. der Stromverbrauch in der beweglichen Spule ist. Eine Hauptforderung bei der Konstruktion der Wattmeter ist demzufolge, die von den zwei Spulen erzeugten Felder möglichst gut auszunützen, oder mit anderen Worten, die Amperewindungszahl der Spulen möglichst gering zu halten. Damit geht Hand in Hand eine Verkleinerung der Selbstinduktion, mithin eine Verringerung des eingangs erwähnten Korrektionsgliedes infolge der Phasenverschiebung in der dünndrähtigen Spule.

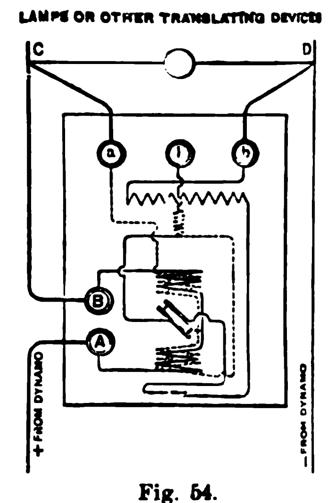


Fig. 54.

42. Weston-Wattmeter. Die Korrektion des Eigenverbrauchs erübrigt sich nun bei den WESTON-Normalwattmetern, deren Meßbereich unter 3 Kilowatt liegt. Diese Wattmeter sind mit einer Kompensationswickelung versehen, die in Fig. 54 mit gestrichelten Linien angedeutet ist. Diese Wickelung besteht aus einer geringen Anzahl Windungen dünnen Drahtes, die um die feste Spule gewickelt, jedoch mit der beweglichen Spule in Serie ge chaltet sind und deren Feld-

wirkung derjenigen der festen Spule entgegengerichtet ist. Die Angaben des Wattmeters werden demzufolge verringert und zwar um den Betrag des Wattverbrauches der beweglichen Spule. Die weitere Konstruktion dieser Wattmeter ist im Prinzipe dem auf Seite 50 beschriebenen Voltmeter ähnlich. Eine feststehende vom Hauptstrome durchflossene Feldspule erzeugt das magnetische Feld, in dem eine leichte Spule, bestehend aus ca. 280 Windungen dünnen Aluminiumdrahtes sich bewegt. Die Empfindlichkeit des Instrumentes beträgt — wie bei den Voltmetern derselben Firma — 0·05 Amp. für vollen Skalenausschlag, wobei die Amperewindungszahl der festen Spule ca. 240 beträgt. Das System befindet sich in einem Mahagonikasten, der oben von einem Hartgummideckel abgeschlossen ist. Dieser Hartgummideckel trägt die Zuleitungen für den Hauptstrom und die Klemmen für den Spannungsanschluß. Eisenteile oder zusammenhängende Metallmassen sind vollständig vermieden, so daß ein Zustandekommen schädlicher Wirbelströme bei Wechselstrommessungen verhindert ist. Neuerdings baut die Firma auch ein Wattmeter mit 3 Strommeßbereichen. Diese besitzen 4 feste Spulen, die vermittelst eines an der Außenseite des Kastens angebrachten Trommelschalters (Fig. 55) alle in Serie, alle parallel, oder je 2 in Serie und gruppenweise parallel geschaltet werden können. Die Instrumente sind mit einer sehr wirksamen Luftdämpfung nach TÖPLERschem Prinzip versehen. (Siehe oben in **10.**)



Fig. 55.

43. Elektrodynamisches Wattmeter von H. & B.

In Fig. 56 ist die innere Konstruktion des Wattmeters der Firma HARTMANN & BRAUN angegeben. Das ganze Instrument ist hier auf eine Grundplatte G aus Isoliermaterial montiert, die durch Rippen versteift ist, um mechanische Veränderungen zu verhindern. Die bewegliche Spule befindet sich im Innern der festen Spule und sitzt auf einer Achse aus Stahl, deren gehärtete Spitzen wie üblich in Saphirsteinen gelagert sind. Letztere werden von zwei in die feste Spule hineinragenden Armen getragen. Diese Arme ihrerseits stehen in starrer Verbindung mit der Luftdämpfungskammer K, deren Deckel in Fig. 56 abgenommen ist. Das Wattmeter besitzt außerdem eine Korrektionsvorrichtung J in Form eines Exzenters zur Einstellung des Zeigers auf Null. Das ganze so zusammengesetzte Wattmeter ist in ein Holzgehäuse eingesetzt, auf dessen Außenseite die Anschlußklemmen für den Starkstrom sichtbar sind. Die feste Spule S ist aus dünnem Kupferband hergestellt, derart, daß zwischen je zwei aufeinanderliegenden Bändern eine isolierende Papierzwischenlage untergebracht ist, um Wirbelströme in den Kupfermassen der Spule zu vermeiden. Durch eine am Kasten sichtbare Umschaltevorrichtung werden nun diese Kupferwindungen fortlaufend in Serie oder teilweise parallel geschaltet. Die Empfindlichkeit der beweglichen Spule beträgt für vollen Skalenausschlag 0·03 Amp. und ihr Selbstinduktionskoeffizient ist ungefähr 0.0045 Henry.

Bei dem neueren Wattmeter dieser Firma sind zwei bewegliche und zwei



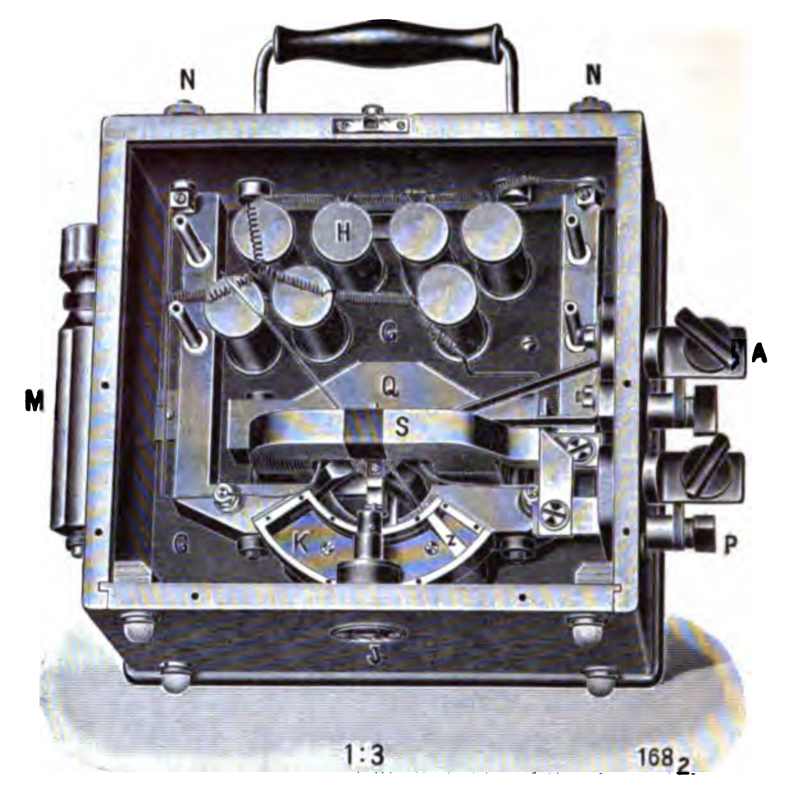


Fig. 56.

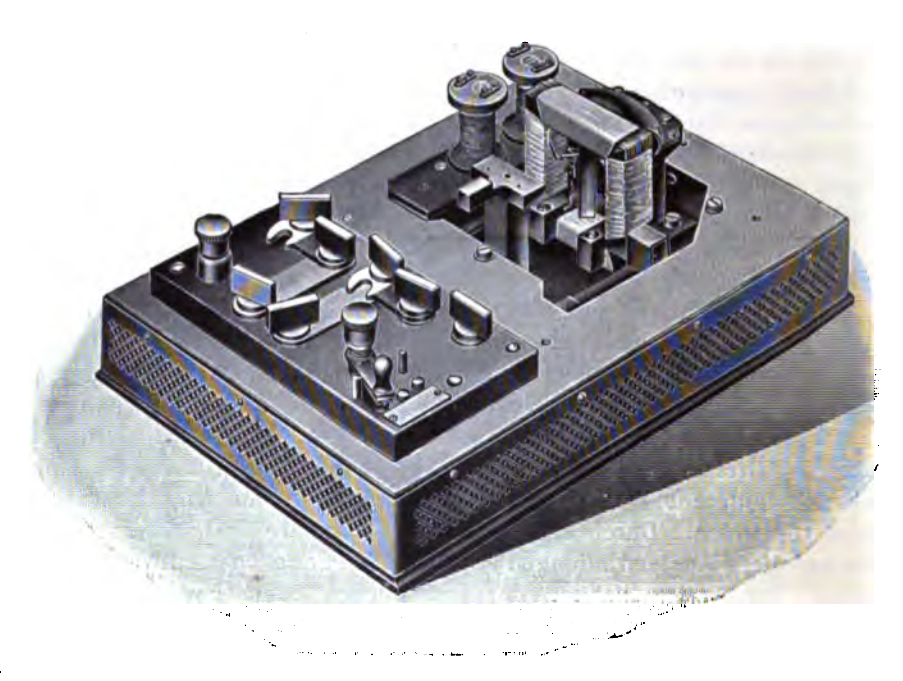


Fig. 57.

feste Wickelungen benutzt. Die Wickelungen haben die Form eines Draht viereckes von unebenen Windungen und zwar sind die festen Vierecke länger als die beweglichen und außen derart umgebogen, daß die Proportionalität der Skala annähernd erreicht wird. (Hdb. II, 2 in **94.**)

44. Elektrodynamisches Wattmeter von S. & H.

Das Wattmeter von Siemens & Halske Fig. 57 (ETZ. 1899, S. 665) besitzt eine den bereits beschriebenen Voltmetern ähnliche Konstruktion (siehe oben in **40**). Die aus zwei Wickelungen bestehende, rechteckige Starkstromspule *MK* ist aus Kupferblechstreifen zusammengesetzt, die durch dünne Streifen Japanpapier isoliert sind. Die Kupferstreifen sind mit passenden Einschnitten versehen, um das Zustandekommen von Wirbelströmen im Kupferkörper selbst auf ein Mindestmaß herabzudrücken (Fig. 58). Wie aus der Abbildung zu ersehen ist, wurde zur Erreichung möglichster Proportionalität zwischen den Zeigerausschlägen und den zu messenden Watt eine eigentümliche Gestalt der Starkstromkörper gewählt. Die Firma ist jedoch in letzter Zeit davon abgegangen, nachdem festgestellt wurde, daß dasselbe Ziel auch mit einer gewöhnlichen Spule von rechteckiger Gestalt, wie in Fig. 57 angegeben, zu erreichen ist (siehe E.T.Z. 1907 S. 270). Eine solche Spule besteht aus gestanzten 0·5 mm dicken, rechteckigen Kupferblechen, die an einer Stelle aufgeschnitten werden; die so geschaffenen Enden werden durch Löten mit den Schnittenden der benachbarten Kupfer-Rechtecke verbunden. Außer diesen Starkstromkörpern aus Kupferblech werden auch noch solche aus Kupferdraht für Strommeßbereiche unter 12·5 Amp. hergestellt. Die Amperewindungszahl der festen Spule beträgt durchschnittlich 400. Die Streifen werden in Gruppen geteilt, die je nach dem gewünschten Meßbereich in Serie oder parallel geschaltet werden. Als bewegliche Spule *c* ist dieselbe wie bei den Voltmetern dieser Firma verwendet. Sie besteht aus mit Seide besponnenem Kupferdraht und besitzt 400 Windungen und einen Widerstand von 100 Ohm. Der Selbstinduktionskoeffizient der beweglichen Spule beträgt 0·0053 Henry. Die Empfindlichkeit für vollen Ausschlag beläuft sich auf 0·03 Amp.

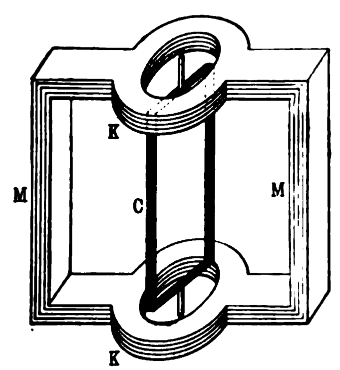


Fig. 58.

Die zur Befestigung des Systems dienenden Böcke, ebenso die Platte, die beim Voltmeter aus Messingguß hergestellt waren, sind hier durch solche aus Vulkanasbest ersetzt. Ebenso ist der Bock, auf dem die Skala montiert ist, aus Isoliermaterial hergestellt. Hierdurch sind die schädlichen Wirbelströme fast vollständig vermieden, während bei der früheren Verwendung derselben Teile aus Metall die Gleichstromangaben der Instrumente von denjenigen der Wechselstromangaben bei 60° Phasenverschiebung um etwa 10% differierten. Die Anordnung der beweglichen Spule und der Dämpferkammer ist aus Fig. 59 ersichtlich; über die Dämpfung selbst ist oben in **10b** Näheres angegeben.


Fig. 59.

Die Firma hat neuerdings auch ein Drehstrom-Wattmeter auf den Markt gebracht, welches gestattet, die gesamte in einem ungleich belasteten Drehstromnetze vorhandene Leistung durch eine einzige Zeigerablesung zu messen. Dieses Wattmeter ist ebenfalls nach dem elektrodynamometrischen Prinzip aufgebaut und besteht aus zwei Wattmetern der oben beschriebenen Ausführung, die übereinander angeordnet sind. Die beweglichen Spulen $c\,c$ derselben sind zwangläufig miteinander verbunden. Die Schaltung ist aus Fig. 60 ersichtlich. Es sind hierbei mit wenigen Abänderungen dieselben festen und beweglichen Spulen verwendet, wie bei dem einfachen Wattmeter; das gleiche gilt von der Luftdämpfung. (ETZ. 1907, Heft 12.)

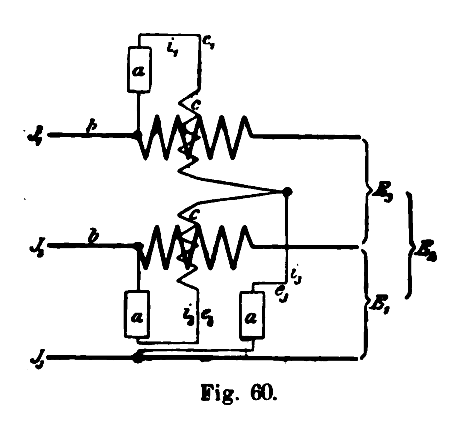


Fig. 60.

45. Elektrodynamisches Wattmeter von Lord Kelvin.

Das Wattmeter von Lord KELVIN besteht aus einer Hauptstromspule (Kupfer), welche die Form der Zahl 8 besitzt (Fig. 61), so daß die magnetischen Achsen der von den zwei Schleifen erzeugten Felder vertikal verlaufen. Das Instrument besitzt zwei aus Aluminiumdraht gewickelte bewegliche Spulen,

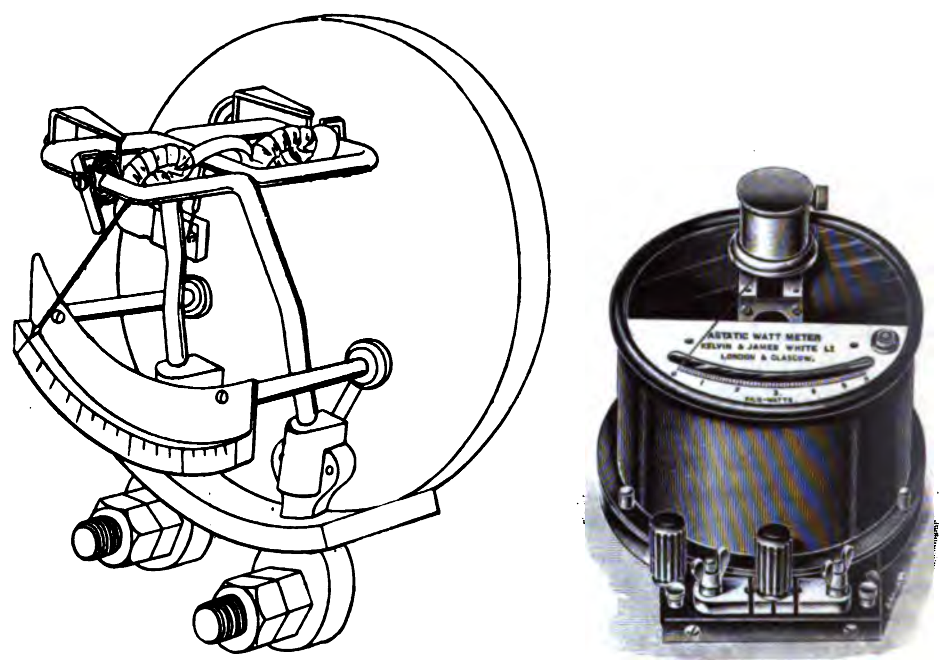


Fig. 61. Fig. 61 a.

die, wie in Fig. 61 angegeben, miteinander verbunden sind. Diese astatische Anordnung hat den Vorteil, daß das Instrument von äußeren Magnetfeldern nicht beeinflußt wird, was besonders bei Gleichstrommessungen von Vorteil ist, da man hierbei nicht gezwungen ist, den Strom zu wenden. Aus Fig. 62 ist zugleich die Aufhängungsweise der Spulen ersichtlich, die vermittelst zweier Haken aus Phosphorbronze, auf welchen entsprechend ausgebildete Schneiden

ruhen, erfolgt. Die Stromzuführung zu den beweglichen Spulen, wie auch die kontrollierende Gegenkraft wird auch hier, wie üblich, von Spiralfedern besorgt. Jede einzelne bewegliche Spule besitzt 1000 Windungen und einen Widerstand von ca. 100 Ohm. Die Empfindlichkeit beträgt 0·05 Amp. für vollen Skalenausschlag. Die wegen der Selbstinduktion der Spulen anzubringende Korrektur beträgt nach Angaben der bauenden Firma (KELVIN & JAMES WHITE, London) ca. 0·13 % bei einer Netzspannung von 100 Volt

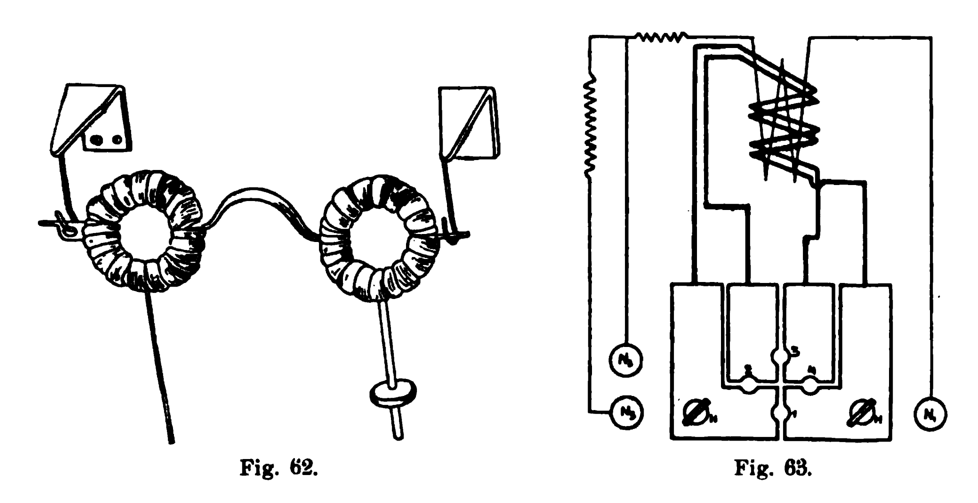


Fig. 62. Fig. 63.

und einer Periodenzahl von 50 pro Sekunde. Bei höheren Spannungen bzw. geringerer Periodenzahl ist die Korrektur geringer.

Dasselbe astatische System ist auch zum Bau tragbarer Wattmeter verwendet worden. Bei dieser Ausführung sind die beweglichen Spulen an einem Phosphorbronze-Draht aufgehängt, dessen oberes Ende mit einer Regulierschraube verbunden ist; mit Hilfe dieser Schraube können etwaige Nullpunkts-Abweichungen korrigiert werden (Fig. 61 a). Die Spulen des Instrumentes können mittels der in Fig. 61 a sichtbaren Stöpsel auch so geschaltet werden, daß das Meßgerät als Strommesser mit einem oder zwei Meßbereichen benutzt werden kann.

46. Elektrodynamisches Wattmeter der A.E.G.

Die elektrodynamischen Wattmeter der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft sind auf Seite 51 bereits beschrieben. In Fig. 63 ist das Schaltschema der Leistungsmesser wiedergegeben. Je nachdem man nur in 3 oder zugleich in 2 und 4 stöpselt, sind die festen Spulen hintereinander oder parallel geschaltet. Der Anschluß des Hauptstromes geschieht bei *H H*. Das Instrument ist für zwei Strom- und zwei Spannungsmeßbereiche gedacht; letztere werden an den Klemmen N_1 N_2 bzw. N_1 N_3 angeschlossen. —

IV. Induktionsinstrumente.

Die Induktionsinstrumente verdanken ihre Entstehung hauptsächlich den Forschungen von FERRARIS; sie gingen aus seinen Arbeiten über den Induktionsmotor hervor, dem er bekanntlich keinen großen Erfolg prophezeite. Die Entwickelung und der Fortschritt dieser Erfindung erstreckt sich auf einen Zeitraum von rund 20 Jahren und hat ein eifriges Studium einer

ganzen Anzahl Konstrukteure erfordert, bis sie zur jetzigen brauchbaren Form gelangt ist.

47. Erläuterung des Meßprinzips

Das Prinzip dieser Instrumente geht aus Fig. 64 hervor, in welcher ein Induktionswattmeter von JAMES SWINBURNE dargestellt ist. Soll das Instrument als Voltmeter gebaut werden, so erhalten die Spulen A_1 und A_2 eine Wickelung mit hoher Induktion, so daß das Feld im Eisenkern, um den sie gewickelt werden, um etwa 90 Grad hinter der es erzeugenden Spannung zurückbleibt. In der beweglichen Spule C wird dadurch eine EMK. erzeugt; dieselbe kann sich im Luftzwischenraum frei bewegen. Die dritte Spule erhält eine induktionsfreie Wickelung, so daß der sie durchlaufende Strom praktisch in Phase mit der Spannung ist; dasselbe gilt demnach von dem Strome in der beweglichen Spule. Die Skalen dieser Instrumente haben quadratischen Charakter, wie bereits in Band II, 1 in 27 erläutert. Durch mechanische Mittel (zweckmäßige Justierung der Balanciervorrichtungen usw.) wird eine von der quadratischen etwas abweichende Gesetzmäßigkeit erreicht. Ein Nachteil, der allen Drehfeld-Meßgeräten anhaftet, ist ihre Abhängigkeit von der Periodenzahl des Wechselstromes. Für Gleichstrom sind dieselben naturgemäß nicht verwendbar (Hdb. II, 1 in 27).

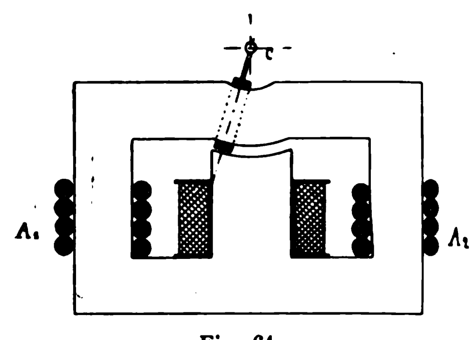


Fig. 64.

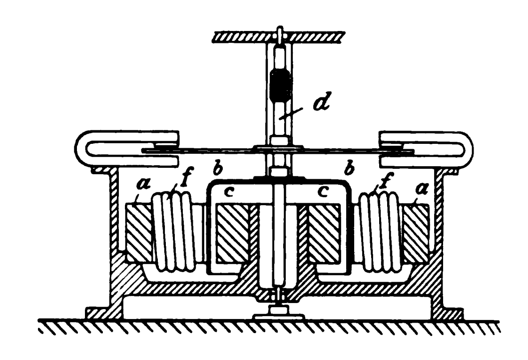
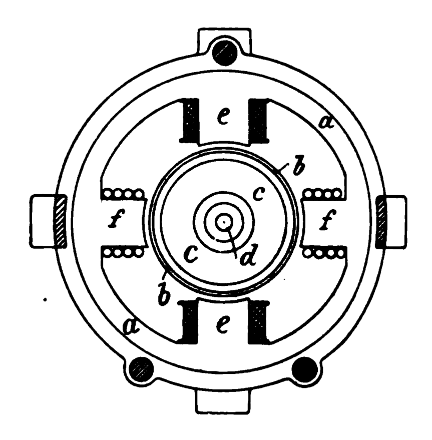


Fig. 65.



48. Ferraris-Instrumente von S. & H.

Das FERRARIS-Prinzip wurde von SIEMENS & HALSKE hauptsächlich für den Bau der Elektrizitätszähler verwendet (siehe Abschnitt 6). Es besteht im wesentlichen aus einem Eisenring *a* (Fig. 65) mit 4 nach innen gerichteten Polansätzen *ee ff*. Innerhalb des Eisenringes *a* befindet sich in geringem Abstande von den Polansätzen ein ebenfalls feststehender Eisenzylinder *c*; über ihn ist eine leichte Alluminiumtrommel *b* gestülpt, welche um die Achse *d* drehbar angeordnet ist. Die Polansätze *ee* und *ff*

erhalten entsprechende Wickelungen, die je nach der Verwendung des Instrumentes wie folgt dimensioniert und geschaltet werden:

a) Amperemeter. Die Spulen erhalten grobe Wickelung und werden vom Hauptstrom selbst oder vermittelst Meßtransformatoren von einem jenem proportionalen Strome durchflossen. Das von beiden Feldern erzeugte Drehmoment ist dem Quadrate des Stromes proportional.

b) Voltmeter. Die Spulen erhalten entsprechend dünnere Wickelungen, die in Verbindung mit einem induktionslosen Vorschaltwiderstand (oder auch einem Meßtransformator, Spannungswandler) an die zu messende Spannung gelegt werden. Das Drehmoment ist dem Quadrate der Spannung proportional.

c) Leistungsmesser. Die Polansätze ff erhalten eine vom Nutzstrom J durchflossene Wickelung, während die Wickelung der Polansätze ee von einem Strome i durchflossen wird, der der Spannung proportional ist. Das von den Feldern erzeugte Drehmoment ist proportional dem Produkte aus J und i und dem Sinus der Phasenverschiebung zwischen J und i. Da jedoch die Leistung proportional dem Cosinus des Phasenverschiebungswinkels zwischen Strom und Spannung ist, so muß von vornherein das Feld der Spannungsspule um 90 Grad gegen die Spannung verschoben werden. (Hierüber siehe Hdb. II, 1 in 27, und Abschn. 6.) Hierin liegt das Unterscheidungsmerkmal zwischen den Leistungsmessungen, die auf dem Induktionsprinzip und denjenigen, die auf dem dynamometrischen Prinzip beruhen, deren Drehungsmoment dem Cosinus der Phasenverschiebung zwischen J und i proportional ist. Das von S. & H. angewandte Mittel zur Erzielung der Phasenverschiebung von 90 Grad zwischen dem Strome i und der ihn erzeugenden Spannung besteht darin, daß die beiden Spannungsspulen des Meßgerätes mit zwei induktionsfreien Widerständen zu einer Brücke vereinigt werden, deren Diagonalzweig durch einen ebenfalls induktionsfreien Widerstand gebildet wird; vor die so entstehende Brücke wird eine Drosselspule geschaltet (siehe Abschnitt 6).

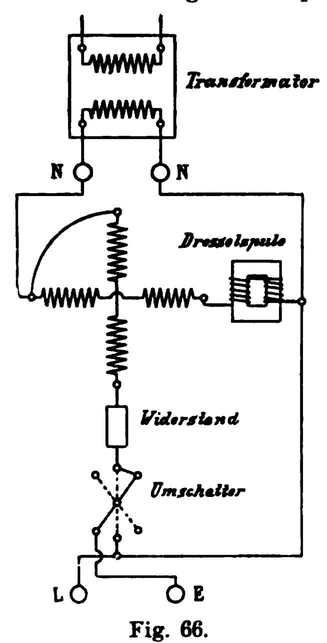


Fig. 66.

d) Isolationsmesser. — Dieser stellt gewissermaßen einen Leistungszeiger dar, dessen Stromwickelung für sehr kleine Ströme eingerichtet ist. Seine Schaltung ist aus Fig. 66 ersichtlich. Die Spannungswickelung wird direkt an die Betriebsspannung angeschlossen und zwar bei NN. Die zu prüfende Leitung, die außer Betrieb steht, schließt man an die mit L bezeichnete Klemme an, während man an E entweder eine Erdverbindung oder die andere Leitung legt, je nachdem man die Isolation einer Leitung gegen Erde oder beider Leitungen gegeneinander messen will. Vermittelst des skizzierten Umschalters kann in rascher Hintereinanderfolge die Isolation gemessen resp. die Netzspannung kontrolliert werden. Bei Hochspannungen wird zwischen Netz und Instrument der angedeutete Transformator eingeschaltet.

49. Kompensation des Temperatureinflusses.

Um den Einfluß der Temperatur auf das Drehmoment der FERRARIS-Instrumente zu kompensieren, schaltet die Firma (D.R.P. 146186) in den

zwei Stromzweigen passende Widerstände ein, die mit der Änderung der Stromstärke eine gleichzeitige Änderung der Phasenverschiebung, in solchem Sinne und in solcher Größe bewirken, daß sie den Einfluß der ersteren Änderung auf das Drehmoment ausgleicht.

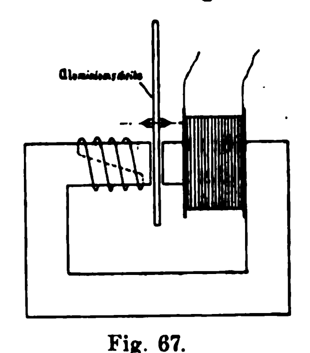


Fig. 67.

Es möge an dieser Stelle erwähnt werden, daß die Kompensation des Temperatureinflusses bei Induktionsinstrumenten in verschiedener Weise versucht wurde. So treffen z. B. DAVIS und CONRAD (WESTINGHOUSE Co.) die Anordnung derart, daß eine in sich vollständig geschlossene Entmagnetisierungsspule *a* auf dem Eisenkörper angebracht wird (Fig. 67). Der Widerstand der Spule vergrößert sich mit der Temperatur in hohem Maße und der Einfluß letzterer auf die Angaben des Instrumentes wird demnach entsprechend verringert.

50 Induktionsinstrumente der AEG.

Die Induktionsinstrumente der Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft beruhen auf der elektrodynamischen Schirmwirkung und haben folgende Anordnung:

Zu beiden Seiten einer um die Achse *A* drehbaren Metallscheibe (Fig. 68) befinden sich die Wechselstrom-Magnetspulen *M* einander gegenüber. Vor diesen befinden sich die Aluminiumplatten (Schirme) *T*, welche die Polflächen teilweise bedecken. Die Kraftlinien, die von einem Magnetpol zum anderen übergehen, treffen zum Teil die feststehenden Schirme, zum Teil die drehbare Scheibe und induzieren in ihnen in sich geschlossene Ströme. Da diese Ströme von demselben magnetischen Felde erzeugt werden, haben sie dieselbe Richtung und ziehen sich infolgedessen an. Da ferner die in der drehbaren Scheibe induzierten Ströme links seitwärts von dem Schirm (neben dem unbedeckten Teile der Magnetpole) ihren Sitz haben, so erhält die Scheibe ein Drehmoment im Sinne des Pfeiles. Diesem Drehmoment wird durch die Wirkung einer Spiralfeder oder durch das Drehmoment eines Gewichtes das Gleichgewicht gehalten. Auf die Scheibe wirkt außerdem ein Dauermagnet in derselben Weise wie bei den Hitzdraht-Meßinstrumenten, um eine gute Dämpfung hervorzubringen. In der praktischen Ausführung reichen die schirmenden Platten nicht über die drehbare Scheibe hinaus, sondern sind aufgebogen, so daß sie oben und rechts den Pol auch seitlich bedecken.

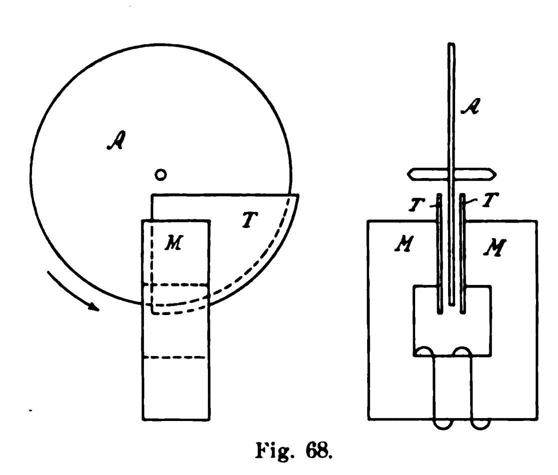


Fig. 68.

Diese Bauart ist im Prinzip bei Voltmetern und Amperemetern dieselbe. Für Voltmeter über 1000 Volt und Amperemeter für sehr starke Ströme werden Spannungs- resp. Stromwandler benutzt. — Die Wattmeter dagegen enthalten 3 Magnete, von denen der mittlere im Hauptstrom, die

beiden äußeren im Nebenschluß liegen. Die Metallschirme befinden sich nur auf den beiden äußeren Magneten. Es sind hier zwei Spannungsmagnete angeordnet, um durch Astasie äußere Einflüsse zu kompensieren. Ferner ist auch hier der Dauermagnet zur Erzielung der Dämpfung angeordnet.

Dasselbe Prinzip ist von der AEG. auch zum Bau registrierender Instrumente ausgebildet worden.

V. Hitzdrahtinstrumente.

Über die Messung der Stromstärke mittels der Wärmewirkung des Stromes im allgemeinen, sowie über die Theorie der Hitzdrahtstrommesser im speziellen, siehe Hdb. II, 2 in **160** usw.

Das älteste Instrument dieser Type, das wir Major Cardew zu verdanken haben, ist fast nur noch in historischen Exemplaren in Verwendung. Die allgemeine Verwendbarkeit des Hitzdrahtprinzips in der Technik setzt mit der Konstruktion von Hartmann & Braun ein (**53**).

Die Hauptschwierigkeit in der Konstruktion eines Hitzdrahtinstrumentes besteht darin, daß man es mit minimalen Längenänderungen des Drahtes zu tun hat, die stark vergrößert werden müssen, um gut sichtbare Ablesungen zu erhalten. Die Art der Vergrößerung ist an den einzelnen Beschreibungen und Abbildungen ersichtlich.

51. Die Nachteile der Hitzdrahtinstrumente.

Die hauptsächlichsten Nachteile dieser Instrumente, wenn auch nicht bei allen Ausführungen im selben Grade, sind folgende:

1. Großer Stromverbrauch. Der Spannungsverlust in den Amperemetern liegt zwischen 0·15 bis 0·5 Volt, der Stromverbrauch der Voltmeter zwischen 0·1 und 0·3 Amp.

2. Unsicherheit der Nulllage.

3. Einfluß der umgebenden Temperatur. Um diesen zu vermeiden, wird oft das System auf einer Grundplatte montiert, deren Ausdehnungskoeffizient gleich dem des Hitzdrahtes selbst ist; da aber letzterer viel rascher der Temperatur folgt, als ersterer, so ist der angegebene Einfluß nicht immer vollständig beseitigt. Wirksamer scheinen dagegen die Anwendungen von Paralleldrähten aus bestimmten Legierungen etc.

4. Die Skalen sind dem Jouleschen Gesetz entsprechend quadratisch. Während dies nun bei den Amperemetern einen wesentlichen Nachteil bedeutet, ist es bei den Voltmetern nicht in demselben Maße der Fall, da man bei diesen in Zentralen nur bestimmte Punkte (Netzspannung etc.) benutzt.

5. Die Drähte werden stark erhitzt, um eine möglichst große Ausdehnung zu erzielen: sie pflegen demnach keine große Überlastung zu vertragen. Eine vorgeschaltete Sicherung ist nicht immer der beste Schutz, da die Masse des Hitzdrahtes für gewöhnlich so gering ist, daß dieser schneller der Temperatursteigerung folgt als die Sicherung. Dagegen ist der Schutz wirksamer, der durch einen vom Draht selbst bei Überlastung hergestellten Kurzschluß im Innern des Instrumentes erfolgt (siehe 54).

52. Die Vorteile der Hitzdrahtinstrumente.

Es müßte nach alledem verwundern, daß die Hitzdrahtinstrumente trotzdem in der Technik verhältnismäßig große Verwendung gefunden haben. Es ist dies zunächst dadurch erklärt, daß man für die Messung von Wechselströmen zurzeit, als die Hitzdrahttype eingeführt wurde, keine besseren

Instrumente besaß. Für bestimmte Anwendungsgebiete trifft dies heute noch zu. Anderseits sind auch die Vorteile der Hitzdrahtinstrumente nicht zu verkennen. Als solche seien erwähnt:

1. Verwendbarkeit von Shunts bei den Amperemetern, wodurch das Meßgebiet ein- und desselben Instrumentes beträchtlich erweitert wird. Diesen Vorteil besitzt kein anderes System für Wechselstrom.

2. Gleiche Angaben für Gleich- und Wechselstrom. Es ist ein besonderer Vorteil dieser Instrumente, daß sie mit Gleichstrom geeicht werden können.

3. Unabhängigkeit von der Frequenz des Wechselstromes; besonders für Laboratorien ist dieser Vorteil ganz wesentlich.

4. Unabhängigkeit von äußeren Magnetfeldern.

5. Unabhängigkeit von der Kurvenform des Wechselstromes.

Über Hitzdrahtinstrumente mit Spiegelablesung siehe Hdb. II, 2 in **162** u. f.

Wichtig für die Technik sind die Hitzdrahtinstrumente mit Zeigerablesung. Im folgenden sollen die für die Praxis gebräuchlichsten Typen behandelt werden.

53. Hitzdrahtinstrumente von H. & B.

Das Prinzip der Hitzdrahtinstrumente von Hartmann & Braun ist in Hdb. II, 2 in **163** beschrieben worden. Hier sei noch einiges in konstruktiver Hinsicht nachgetragen:

Die durch die Stromwärme verursachte Durchbiegung eines stromdurchflossenen Platinsilberdrahtes AB wird auf ein mit Spitzen in Steinen gelagertes, drehbares System übertragen. Eine auf der Systemachse angeordnete Aluminiumscheibe D, die sich in dem Felde eines permanenten Magneten M bewegt, erfährt eine wirksame Dämpfung, so daß die Zeigereinstellung fast aperiodisch erfolgt. Die Durchbiegung des Hitzdrahtes wird zunächst von dem Phosphorbronzedraht CF aufgenommen; letzterer erfährt seinerseits infolge der Spannkraft der Feder S, die sich durch den Coconfaden HE überträgt, eine Durchbiegung. Die Feder H besorgt mithin die Wirkung der kontrollierenden Gegenkraft, analog den Spiralfedern bei den Meßgeräten mit beweglicher Spule. Das weitere Ausbalancieren des Systems geschieht vermittelst des Gewichtes b. Der Faden HE ist um eine Rolle, die auf der Achse des Zeigers befestigt ist, gewunden; hierdurch erfolgt der Zeigerausschlag. Etwaige Nullpunktsabweichungen werden durch die Feder bei A korrigiert. Der Einfluß der Außentemperatur wird durch eine Grundplatte aus passender Legierung kompensiert.

Der Unterschied zwischen den Voltmetern (Fig. 69) und den Amperemetern (Fig. 70) liegt hauptsächlich in der Stärke und Schaltung des Hitzdrahtes. Dieser wird bei den Amperemetern zum Zwecke der Verminderung des Eigenwiderstandes mit einem größeren Querschnitt gewählt und ferner durch Nebenschließungen $a\,e\,d$ und $A\,f\,B$ unterteilt. Der gesamte in diesem Kompensationswiderstand fließende Strom beträgt 4 bis 5 Amp. bei einem Spannungsabfall von 0·2 bis 0·3 Volt. In der Fig. 70 sind die weiteren Details des Systems fortgelassen, da sie mit denjenigen des Voltmeters fast vollkommen analog sind. R bezeichnet bei dem Voltmeter den Vorschaltwiderstand, beim Amperemeter den Shunt.

Die Firma führt tragbare, als solche auch kombinierte und Schalttafelinstrumente aus. Das System ist in beiden dasselbe; der Unterschied liegt in der Ausführungsform wie auch darin, daß die tragbaren Instrumente zur Vermeidung von Parallaxefehlern mit Messerschneidezeiger und Spiegelablesung ausgerüstet sind.

Die Amperemeter werden bis zu 100 Ampere mit innerem Shunt, die Voltmeter bis zu 400 Volt mit innerem Vorschaltwiderstand ausgeführt. Letztere sind mit auswechselbaren Abschmelzsicherungen versehen.

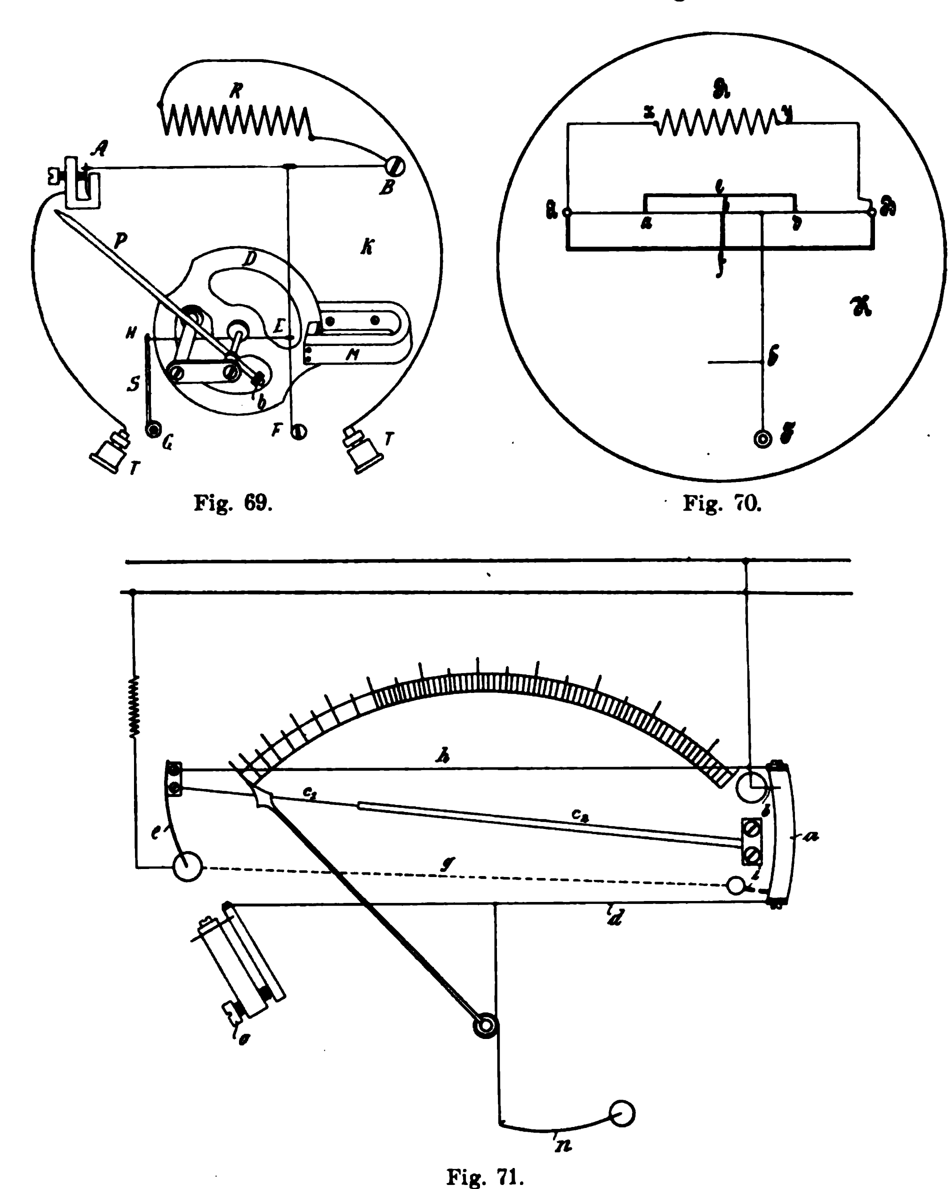


Fig. 69.

Fig. 70.

Fig. 71.

Die Hitzdrahtinstrumente sind nach Angaben der Firma bei den meisten Ausführungen bis zum doppelten Betrag ihres Meßbereiches überlastungsfähig. Der Stromverbrauch der Voltmeter beträgt durchschnittlich 0·2 Amp. für vollen Skalenausschlag, während der Spannungsabfall an den Klemmen der Amperemeter ca. 0·25 Volt beträgt.

Zur Messung hochgespannter Wechselströme werden Spannungstransformatoren verwendet, wodurch die Instrumente im Niederspannungskreis zu liegen kommen.

54. Hitzdrahtinstrumente von Dr. Paul Meyer A.-G.

Das System der Hitzdrahtinstrumente von Dr. PAUL MEYER, A.-G., Berlin (DRP. Nr. 135 736) beruht auf Folgendem:

Die durch die Stromwärme bewirkte Längenausdehnung eines Hitzdrahtes h (siehe Fig. 71) wird durch ein Hebelsystem a aufgenommen, dessen reibungslosen Drehpunkt eine Blattfeder b bildet. Diese hat die fernere Bedeutung, noch die Längenausdehnung des Drahtes aufzunehmen und durch den zweiten Arm des Hebels zur Übertragung auf die Zeigerachse zu bringen. Um die Angaben des Instrumentes von der Außentemperatur unabhängig zu machen, ist ein zweiter, nicht von Strom durchflossener, aus zwei Teilen c_1 c_2 verschiedenen Materials zusammengesetzter Kompensationsdraht vorgesehen, der mit dem einen Ende an der Spannfeder e und mit dem anderen Ende an einem festen Lager befestigt ist. Diese der bekannten HOLDENschen Kompensierung sich anschließende Anordnung ist in ihrer Wirkungsweise ohne weiteres verständlich.

Um die Instrumente vor den Folgen der Überlastungen zu schützen, kann der Hitzdraht bei Überschreitung des höchsten Meßbereiches dadurch kurzgeschlossen werden, daß das längere Ende des Hebelarmes in der Maximalstellung einen Kontakt i berührt, wobei ein zum Hitzdraht parallel gelegter Draht g niedrigen Widerstandes eingeschaltet wird. Die Anordnung ist so getroffen, daß die Parallelschaltung schon bei einer Überschreitung des Maximalstromes um 10 % erfolgt. Die Spannfeder n dient als Gegenkraft, während etwaige Nullpunktsabweichungen durch Drehen der Schraube o ausgeglichen werden. Das Amperemetersystem unterscheidet sich von dem in Fig. 71 skizzierten Voltmetersystem dadurch, daß der etwas stärkere Hitzdraht in vier Teile unterteilt ist, wodurch sein OHMscher Widerstand und mithin der Spannungsabfall entsprechend verringert wird.

Der Stromverbrauch der Voltmeter beträgt bei vollem Skalenausschlag ca. 0·1 Amp. und der Spannungsverlust an den Enden des Abzweigwiderstandes der Strommesser bei vollem Ausschlage etwa 0·2 Volt.

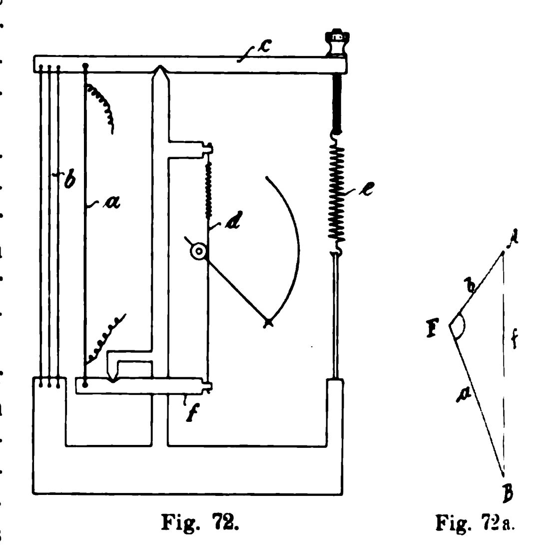


Fig. 72. Fig. 72a.

55. Hitzdrahtinstrumente von Chauvin & Arnoux.

Das Hitzdrahtinstrument der Firma CHAUVIN & ARNOUX in Paris hat die in Fig. 72 gegebene Anordnung. Bemerkenswert ist hierbei zunächst die Vorrichtung zur Kompensation des Einflusses der umgebenden Temperatur. Ein Bündel b mehrerer isolierter Drähte vom selben Querschnitt und Material wie der Hitzdraht a, sind mit einem Ende am Gestell des Systems, mit dem anderen Ende an dem einen Arm eines Hebels c befestigt. Durch die am zweiten Hebelarm angebrachte Springfeder e werden die Drähte kräftig gespannt. Neben diesem Drahtbündel ist der Hitzdraht gezogen, der mit dem einen Ende am selben Hebelarm befestigt ist, während sein anderes Ende in Verbindung mit einem Multiplikationssystem die Zeigerachse dirigiert.

und zwar mit Hilfe eines Coconfadens d, der stets durch eine Feder gespannt gehalten wird.

Es ist ersichtlich, daß, wenn die Umgebungstemperatur die Länge des Drahtbündels ändert, diese von der Springfeder stets in gleicher Spannung gehalten wird, und daß sich lediglich die Verlängerung des Hitzdrahtes bei durchfließendem Strom auf die Zeigerbewegung überträgt. Fig. 72 zeigt die Wirkungsweise des Kompensationssystems.

Da die Kompensationsdrähte vom selben Material und Querschnitt wie der Hitzdraht sind, so ist das thermische Gleichgewicht stets konstant und somit die Nulllage gesichert.

Um die geringe Verlängerung des Hitzdrahtes auf einen großen Skalenausschlag zu übertragen, ist folgende Eigenschaft eines Dreiecks ausgenutzt worden.

ABF sei ein Dreieck, dessen Winkel F wenig von π verschieden ist (Fig. 72a). Dann gilt:

$$f^2 = a^2 + b^2 - 2\,a\,b\cos\cdot F.$$

Durch Differenzieren dieser Gleichung:

$$f\cdot df = ab\sin F\cdot dF$$

somit

$$\frac{dF}{df} = \frac{f}{a\,b\sin F}.$$

d. h. für eine Änderung df der Seite f wird die Änderung dF des Winkels F ein Maximum, wenn dieser nahe an 180^0 und b möglichst klein gehalten wird.

Diese Anordnung gestattet einen möglichst großen Skalenausschlag bei geringem Stromverbrauch der Instrumente. Derselbe beträgt bei den Volt-

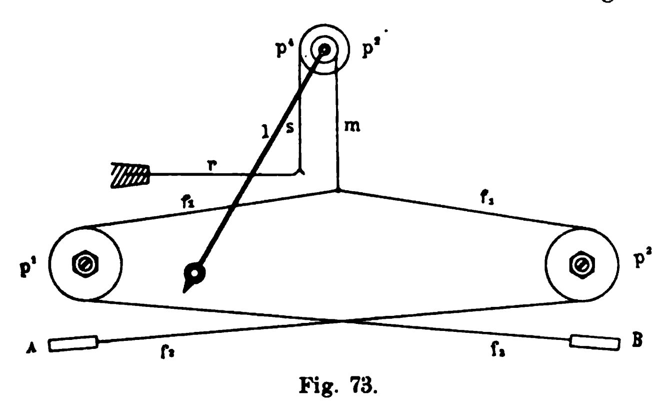


Fig. 73.

metern 0·1 Amp., während die Amperemeter einen Spannungsabfall von 0·15 Volt erfordern. Die Nebenschlußwiderstände werden viel kleiner und werden von der Firma in denselben Dimensionen gehalten, wie die Gleichstromshunts. Die Instrumente können angeblich bis zum dreifachen ihres Meßbereiches überlastet werden. Eine regulierbare Schraube dient dazu, die durch Überlastung event. eingetretene Abweichung von Null wieder richtig zu stellen.

Im Folgenden seien noch einige Konstruktionen beschrieben, welche beweisen, wie mannigfach das Hitzdrahtprinzip ausgebildet werden kann, und wie rege der Wunsch der Technik ist, ein von der Periodenzahl, Kurvenform und äußeren magnetischen Einflüssen unabhängiges Wechselstrominstrument zu besitzen.

56. Hitzdrahtinstrumente der Cie. p. la fabr. d. compteurs.

Dem Hitzdrahtsystem der Compagnie pour la fabrication des compteurs liegt folgende Anordnung zugrunde.

Die Voltmeter messen die Differenz der Durchbiegung beider Hälften eines Drahtes mit hohem Widerstand f_1, f'_1, f_2, f_2, der an zwei Punkten A und B befestigt und über die Rollen p_1 und p_2 geführt ist (Fig. 73). Die Dehnung des Drahtes wird auf den Zeiger J durch den Faden m übertragen, der seinerseits über eine Rolle p_3 geführt wird und vermittelst der Feder r in der im Schema gezeigten Weise stets gespannt wird. Die Rolle p_3 und p_4 sind auf der Zeigerachse montiert.

Der Ausdehnungskoeffizient des Gestells, das den ganzen Apparat trägt, ist ungefähr derselbe wie derjenige des Hitzdrahtes, wodurch die Nullage gegen äußere Temperatureinflüsse annähernd gesichert wird. Der Stromverbrauch des Voltmeters ist angeblich 1·5 bis 2 Zehntel Ampere.

Bei den Amperemetern ist nun erforderlich, den Spannungsabfall des Instrumentes auf ein Minimum zu reduzieren. Das hier zur Anwendung kommende System (Fig. 74) besteht aus 2 parallel geschalteten Drähten f_1, f'_1, f_2 und f'_2; der Strom tritt mittels eines elastischen Metallplättchens C in die Mitte der Drähte ein. Die Übertragung der Drahtbewegungen auf die Zeigerachse geschieht auch hier wie bei den Voltmetern; ebenso bildet auch bei den Amperemetern die Feder r die Gegenkraft des Systems, und wird auch bei ihnen der Temperatureinfluß, wie oben angegeben, kompensiert. Dagegen besteht hier der Hitzdraht aus einer Legierung von geringem Widerstand. Nullpunktsveränderungen werden in analoger Weise wie bei den bisher beschriebenen Instrumenten mit Hilfe einer am Gehäuse angebrachten Schraube korrigiert. Die Amperemeter für Niederspannungskreise baut die Gesellschaft in üblicher Weise in Verbindung mit Shunts; für Hochspannungen werden Transformatoren geliefert.

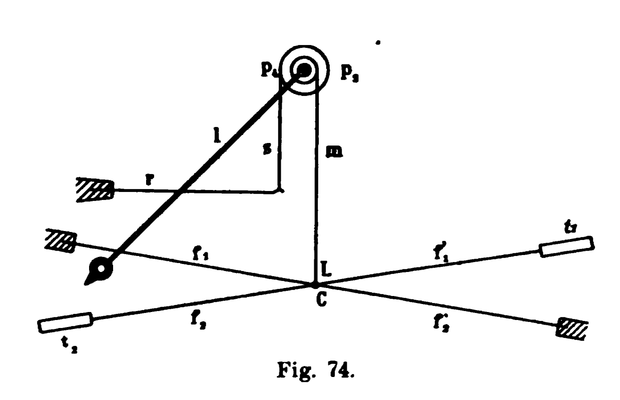


Fig. 74.

57. Hitzdrahtinstrumente von Camillo Olivetti.

Die Anordnung dieses von Arcioni entworfenen Hitzdrahtinstrumentes (l'Electricita, Jahrg. 24 Nr. 13 u. 14) gründet sich auf ein verschiebbares Dreieck, dessen eine Seite durch den beim Stromdurchgang sich dehnenden Hitzdraht gebildet wird. Die Längenänderung dieser Seite wird nun in eigentümlicher Weise auf das Zeigersystem übertragen. Der eigentliche Hitzdraht c ist beiderseits an zwei Federn MM gespannt, von denen erstere am Klemmenstück C, letztere am festen Arm R befestigt ist. Dieser Arm endigt einerseits an der elastischen Feder N am Klemmenstück F und wird anderseits von der Spiralfeder V nach unten gezogen (Fig. 75). Aus dem Schema ersieht man ferner, wie sich diese Bewegung durch den Arm H auf den Zeiger J überträgt. Der zu messende Strom tritt bei TT ein und wird den beiden Enden des Hitzdrahtes durch die biegsamen Leitungen LL zu-
Jede Dehnung des Hitzdrahtes äußert sich durch eine Drehung des um die schwache Feder N und demzufolge durch ein Sinken des

Punktes O und eine entsprechende Bewegung des Zeigers. Die verhältnismäßig robuste Bauart des Instrumentes i t für den gedachten Zweck desselben als Registrierinstrument wohl entsprechend, für ein direktzeigendes Instrument naturgemäß nicht verwendbar.

58. Hitzdraht-Wattmeter.

W a t t m e t e r, auf dem Hitzdrahtprinzip beruhend, sind bisher praktisch noch nicht ausgeführt. Im Jahre 1898 machte Mr. MICHAEL B. FIELD (Electrical Review 1898) den Vorschlag, ein Hitzdrahtvoltmeter in Verbindung

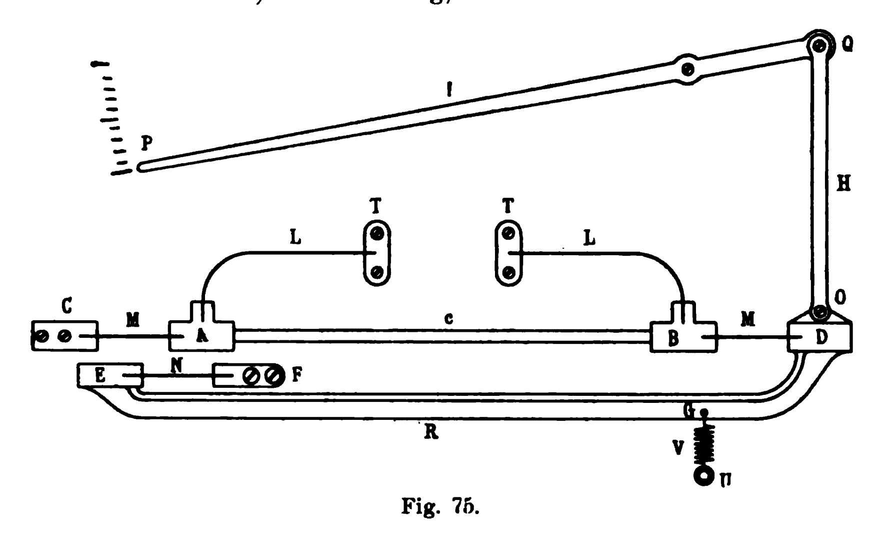


Fig. 75.

mit einem Shunt und einem Spannungswandler nach der in Fig. 76 angegebenen Schaltung zu verwenden. T ist ein Spannungstransformator,

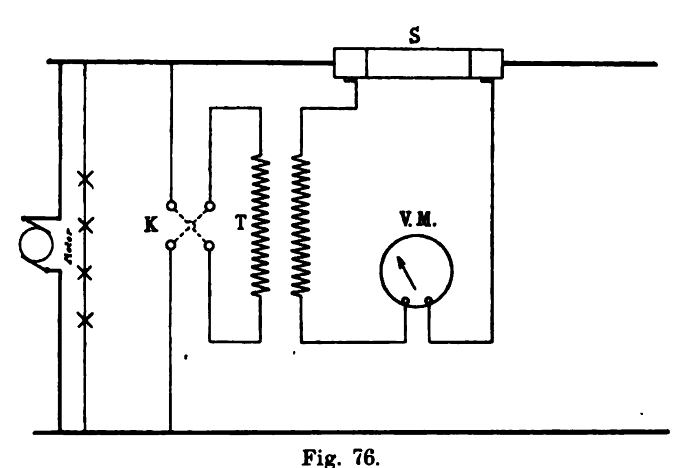


Fig. 76.

dessen Primärwickelung unter Dazwischenschaltung des Umschalters K an die Spannung gelegt wird, S ist der Shunt, dessen Spannungsabfall 1 bis 2 Volt beträgt und VM das Hitzdrahtvoltmeter. Bei einer gewissen Stellung des Umschalters K fließt durch das Voltmeter ein Strom, der proportional ist der Summe der Momentanwerte der Spannung und des Stromes, bei der anderen Stellung des Umschalters ist der Instrumentenstrom proportional der Differenz der soeben angegebenen Momentanwerte. Nun ist der Ausschlag des Instrumentes wie a. a. O. erläutert, proportional dem Quadrate des ihn

augenblicklich durchfließenden Stromes. Zieht man demzufolge die letzte Ablesung von der ersteren ab, so ist das Resultat bis auf eine Konstante den gemessenen Watts proportional, entsprechend der Formel:

$$(e + i)^2 - (e - i)^2 = 4\,ei.$$

Diese Anordnung ist bisher technisch nicht verwertet worden, hauptsächlich aus dem Grunde, weil zwei Messungen erforderlich sind, während die Praxis nur direkt zeigende Instrumente fordert.

Es sind nun verschiedene Versuche angestellt worden, um die Differenzbildung in ein und demselben Instrument zu bewirken, und zwar in der Weise, daß zwei den Zeigermechanismus beeinflussende Kräfte einander entgegenwirken. Diese Anordnung hat den Nachteil, daß die beiden Kräfte unbeabsichtigte Verschiedenheiten, die das Übertragungssystem mit sich bringt, aufweisen, wodurch die Angaben des Instrumentes beeinträchtigt werden. — R. Bauch vermeidet diese Übelstände dadurch, daß die Differenz der beiden oben angegebenen Ausdrücke gebildet wird, ehe das Meßsystem auf das Übertragungssystem einwirkt (ETZ. 1903). Die Ausführungsform ist im Prinzip aus Fig. 77 ersichtlich. Die beiden Hitzdrähte sind mit $i - e$ bzw. $i + e$ bezeichnet. Der eine Endpunkt des Differenzdrahtes ist fest in einem Bock eingespannt, der andere Endpunkt desselben ist an einer Spannfeder befestigt. Das eine Ende des Summendrahtes ist ebenfalls an dieser Spannfeder befestigt, während das andere Ende an einem beweglichen Hebel h liegt. Um denselben Betrag, um den sich der Differenzdraht ausdehnt, wird der eine Spannpunkt des Summendrahtes nach links verschoben. Da letzterer eine größere Ausdehnung als ersterer hat, so verschiebt sich der andere Spannpunkt des Summendrahtes über seine Nulllage nach rechts, wodurch der Hebel h ausschlägt. Dieser Hebel greift an den Übertragungsmechanismus an, der hier aus einem Spanndraht s besteht, dessen Spannlänge durch die Bewegung des Hebels h verkürzt wird. Die infolgedessen eintretende Durchbiegung desselben wird in bekannter Weise zur Bewegung der Zeigerachse benutzt. Eine praktische Ausführung des Instrumentes nach diesem Prinzip ist jedoch bisher noch nicht bekannt geworden.

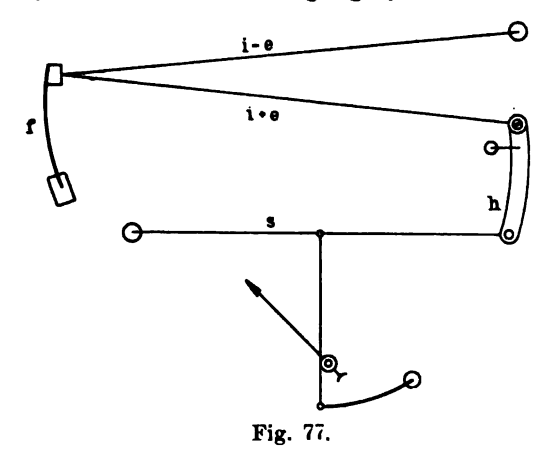


Fig. 77.

VI. Elektrostatische Voltmeter.

59. Vorzüge des Systems.

Zur Messung von Hochspannungen war früher da elektrostatische Voltmeter als technisches Meßinstrument fast unentbehrlich. Nachdem jedoch die Verwendung von Meßtransformatoren bzw. Spannungswandlern weitere Verbreitung erfahren hat und man mithin zur Hochspannungsmessung auch Weicheisen-, elektrodynamische oder Hitzdrahtsysteme heranziehen kann, ist die

Verwendung der einen oder anderen Type — abgesehen von den Vorzügen dieser oder jener Meßmethode — lediglich eine Preisfrage. Zur Prüfung von Hochspannungsanlagen und der in der Hochspannungstechnik gebräuchlichen Apparate und Zubehörteile auf ihre Isolations- und Durchschlagsfähigkeit ist auch heute das elektrostatische Voltmeter das zweckdienlichste Meßgerät.

Der Hauptvorzug der elektrostatischen Voltmeter ist der, daß sie keinen Strom verbrauchen, weshalb sie häufig in Zentralanlagen als Speisepunkts-Spannungsmesser vorgesehen werden, und daß sie von magnetischen Feldern nicht beeinflußt werden. Dagegen können elektrostatische Felder, so z. B. schon das Putzen der Glasscheibe des Instrumentes die Angaben des Voltmeters beträchtlich stören. Diese Fehler werden jedoch durch künstliche Mittel: Überzug mit transparentem Metalllack[1]) etc. fast vollständig vermieden.

Ein weiterer Vorzug dieser Type in technischer Hinsicht ist, daß sie genau wie die Hitzdrahtinstrumente mit Gleichstrom geeicht werden kann, wobei allerdings Vorsicht geboten ist, und daß die Angaben der Voltmeter von der Frequenz des Wechselstromes so gut wie unabhängig sind.

Für niedrigere Spannungen ist das Multizellular-Voltmeter (siehe Seite 72) verwendbar.

Die wirksamen Kräfte, mit denen wir es beim elektrostatischen Voltmeter zu tun haben, sind sehr gering, so daß Reibungsfehler schwer zu vermeiden sind. Um die Kräfte zu vermehren, muß die Entfernung zwischen dem festen und beweglichen Teil auf ein Minimum reduziert werden, doch hat naturgemäß diese Entfernung ihre untere Grenze, die durch Überspringen von Funken oder Bildung von Flammenbogen bedingt ist. Zur Vermeidung der Funkenbildung bei Hochspannungen sind verschiedene Mittel bekannt geworden, so das Bekleiden der Skalen und Quadranten mit Glimmer oder dgl., die Vorschaltung eines hohen Widerstandes vor das Instrument, schließlich die Schaltungsweise nach Peukert (Hdb. II, 2 in **104**). In Band II, 1 in **21** sind die Gründe angegeben und die Formeln entwickelt, aus denen der quadratische Charakter der Skala hervorgeht. Eben dort wurde bereits ausgeführt, daß die Skalenintervalle gegen Ende des Ausschlages im allgemeinen enger werden.

Die Elektrometer usw. sind in den vorhergehenden Bänden ausführlich beschrieben worden (siehe insbesondere Hdb. II, 2 in **97** u. f.). Es bleibt nur noch, die in der Technik gebräuchlichsten Apparate des näheren zu beschreiben. Darunter sind: W. Thomsons elektrostatischer Spannungszeiger.[1]) Derselbe besteht aus einem Luftkondensator, dessen Kapazität durch Vergrößerung oder Verkleinerung der Platten verändert werden kann. Fig. 78 zeigt das für stationären Gebrauch ausgeführte Instrument. Dasselbe enthält 3 Platten; 2 davon sind ruhend, stehen zueinander genau parallel und in metallischer Verbindung, während sie von dem Gehäuse des Apparates sorgfältig isoliert sind. Die zwischen den festen Platten gelegene, um eine horizontale Achse drehbare Platte besteht aus Aluminium und endigt in ihrem oberen Teile in eine feine Nadel, welche als Zeiger über der Skala des Instrumentes spielt. Die Ebene dieser Bewegung ist den festen Platten parallel. Die festen Quadranten werden mit der einen Klemme, die Nadel mit der anderen Klemme der zu messenden Spannung verbunden. Der be-

60. Thomsons elektrostatischer Spannungszeiger.

[1]) Electrical Review 20, p. 500, 1887.

wegliche Doppelflügel trägt unten einen kleinen Haken, woran kleine Gewichte gehängt werden, um das Meßbereich des Instrumentes zu ändern; die Skala wird für gewöhnlich mit 60 Teilstrichen versehen und empirisch geeicht. Die Dämpfung des Instrumentes geschieht mechanisch von Hand. Ein Stift aus Messing, der mittels eines Handgriffes aus Ebonit gedreht werden kann, ist mit Querstiften versehen, an deren Ende ein dünnes Aluminiumrohr mit 2 Seidenfäden aufgehängt wird. Dieses Rohr kann durch Verdrehen des Stiftes mehr oder weniger gegen den Zeiger gepreßt werden. Zur Arretierung dient eine kleine Schraube, durch welche die Nadel an einem Stift befestigt werden kann.

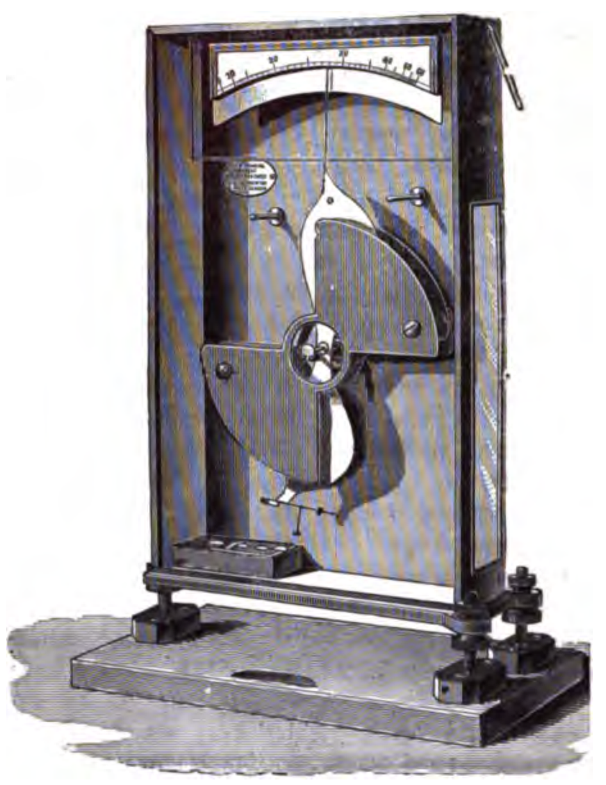


Fig. 78.

Wenn die festen Platten und die bewegliche Nadel mit 2 Punkten eines Stromkreises verbunden sind, zwischen welchen eine Potentialdifferenz besteht, so ist die innere Platte bestrebt, sich so zu bewegen, daß sie die elektrostatische Kapazität des Instrumentes erhöht. Diese Anziehungskraft ist (Hdb. II, 1 in **21**) dem Quadrate der Potentialdifferenz proportional und wird durch die horizontale Komponente des oben erwähnten Gewichtes gemessen. Bei hohen Spannungen bildet sich zwischen den Platten ein Flammenbogen, der eine weitere Messung unmöglich macht, und worin ein Nachteil dieses Instrumentes bei Hochspannungsmessungen zu erblicken ist. Um das Bilden des Flammenbogens zu verhindern und das Meßbereich des Instrumentes nach Möglichkeit zu erhöhen, bedient man sich der von Peukert angegebenen Schaltung mit in Serie geschalteten Kondensatoren (Hdb. II, 2 in **104**). Die Abstimmung der Kondensatoren auf denselben Wert bietet jedoch technisch verhältnismäßig große Schwierigkeiten; man begnügt sich im allgemeinen mit nur 2 Meßbereichen und versieht das Instrument mit einer besonderen Skala für jedes Meßbereich (Benischke, ETZ. 1901).

Vorstehend beschriebenes Voltmeter wird von der bauenden Firma Kelvin & James White in London für Spannungen bis zu 20000 Volt ausgeführt. Für höhere Spannungen werden die gleichfalls von Lord Kelvin angegebenen, sog. elektrostatischen Spannungswagen gebaut. Ein solches Hochspannungsinstrument bis 100000 Volt, welches für Kabelwerke und Prüf-

felder im allgemeinen gedacht ist, zeigt Fig. 79. Diese Spannungswagen bestehen in der Hauptsache aus einer isolierten Metallplatte, die sobald sie statisch geladen ist, eine andere in einiger Entfernung angebrachte Platte oder Schale anzieht. Letztere ist an einem Arm befestigt, der sich über eine empirisch geeichte Skala bewegt. Auch diese Voltmeter werden für gewöhnlich mit 2 Meßbereichen, die durch verschiedene Gewichte erhalten werden, ausgeführt.



Fig. 79.

61. Statische Voltmeter von H. & B.

Von der Firma HARTMANN & BRAUN werden hauptsächlich folgende zwei Typen geführt:

a) Das Hochspannungs-Voltmeter besteht im wesentlichen aus drei relativ großen, rechteckigen, parallel angeordneten Platten, von denen die beiden äußeren, *a*, *c* (Fig. 80), feststehen und entgegengesetzt geladen sind. Die mittlere Platte *b* ist an biegsamen Metallbändern *e* zwischen den ersteren beiden aufgehängt und wird ihrerseits mit einer der beiden festen Platten, z. B. *a*, leitend verbunden. Durch die Verbindung mit den gleichen Polen der Elektrizitätsquelle stoßen sich die Platten *a* und *b* gegenseitig ab, während die entgegengesetzt geladene Platte *c* anziehend auf *b* einwirkt. Die Bewegung der mittleren Platte *b* ist sehr gering; die Übertragung geschieht in eigenartiger Weise mittels eines Fadens, der an dem unteren Ende dieser Platte befestigt ist und sich auf eine an der Zeigerachse angebrachten Walze aufwindet, wodurch die Bewegung vervielfacht wird. Dadurch, daß die beiden festen Platten die bewegliche eng umschließen, wird eine intensive Wirkung erzielt und gleichzeitig ein Schutz gegen störenden Einfluß geschaffen. Auch hier findet die Dämpfung in ähnlicher Weise wie bei den Hitzdrahtinstrumenten durch die Einwirkung eines Dauermagneten auf eine Metallscheibe statt.

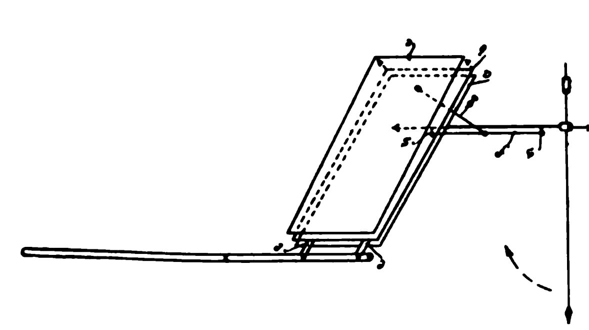


Fig. 80.

Außer zur Messung hoher Spannungen findet das Instrument auch Ver-

wendung zur Isolationsprüfung in Hochspannungsanlagen durch Messung der Spannung irgend eines Leiters gegen Erde.

b) Das Multizellular-Voltmeter (Fig. 81), behält dieselbe Anordnung der Quadranten und der Nadeln wie das gleichartige Lord KELVINsche Instrument, doch ist hier der Aufhängefaden innerhalb der Röhre befestigt, die die Nadeln vereinigt. Die unbequeme Flüssigkeitsdämpfung des Lord KELVINschen Voltmeters ist hier durch die übliche Dämpfung mittels Aluminiumscheiben, die innerhalb der Pole kleiner Magnete rotieren, ersetzt. Die Anordnung ist im übrigen so getroffen, daß 2 senkrecht zueinander angeordnete Rechen von Metallzellen drehend auf ein System wirken, welches aus einer entsprechenden Zahl übereinanderliegender leichter Aluminiumflügel besteht und an einem dünnen Metallband aufgehängt ist. Ein Paar diametral fest angebrachter und von den festen Zellen isolierter Metallplatten dient als Schirm für das in der Ruhelage befindliche, bewegliche System, mit dem sie leitend verbunden sind und erhöhen so gleichzeitig die Anfangsempfindlichkeit. Infolge der Anwendung des Multizellularprinzips ist das Instrument so empfindlich, daß es für Messungen niedriger Spannungen, wie sie bei Lichtbetrieb vorkommen, Verwendung finden kann; besonders eignet es sich auch für Fernspannungsmessung wegen des Fortfalles der bei anderen Voltmetersystemen nötigen Ausgleichswiderstände für die verschiedenen Entfernungen der Speisepunkte.



Fig. 81.

62 Statisches Voltmeter der Westinghouse Co.

Das statische Voltmeter der WESTINGHOUSE MFG. CO.[1]) ist für die Messung sehr hoher Spannungen gebaut und hat folgende in Fig. 82 wiedergegebene Anordnung:

Der bewegliche Teil besteht aus zwei starr miteinander verbundenen metallenen Hohlzylindern M_1 M_2, welche mit dem Zeiger auf einer senkrechten Achse sitzen und sich innerhalb zweier zylindermantelförmigen, metallischen Flächen B_1 B_2 exzentrisch bewegen können. Werden die Flächen B_1 B_2 an Spannung gelegt, so induzieren sie in den Körpern M_1 M_2 statische Ladungen entgegengesetzten Potenzials, so daß eine Anziehung von M_1 und B_1 sowie M_2 und B_2 und somit eine Drehung des beweglichen Teiles eintritt. Dem erzeugten Drehmoment wirkt eine auf der Zeigerachse angebrachte Spiralfeder entgegen, so daß sich der Zeiger P auf der

[1]) Electrical World, 1906, S. 124.

Skala S in eine der zwischen B_1 und B_2 herrschenden Spannung entsprechende Lage einstellt. Um dasselbe Meßgerät für höhere Spannungen benutzen zu können, werden zwischen B_1 und B_2 sowie zwischen den Klemmen T_1 und T_2 Kondensatoren C_1 C_2 eingeschaltet. Die Platten B_1 und B_2, die Kondensatorbleche und die Lagerung des beweglichen Teiles sind an der unteren Fläche des Deckels eines mit Öl gefüllten und metallisch ausgekleideten Holzkastens an gerillten Hartgummisäulen befestigt. Oben auf dem Deckel sitzen die langen, gleichfalls gerillten und kornförmig nach außen gebogenen Säulen für die Anschlußklemmen. Die Skala ist zylindermantelförmig und steht hochkantig, so daß die Ablesung in einiger Entfernung vom Meßgerät erfolgen kann. Der Zeiger selbst spielt in einem Metallgehäuse, welches als Schirm gegen Beeinflussung durch äußere statische Felder dient. Der bewegliche Teil sowie die Platten B_1 B_2 und die Kondensatoren C_1 C_2 sind in Öl von hohem Isolationsvermögen eingetaucht. Hierdurch wird zunächst eine wirksame Dämpfung und ferner eine Verkleinerung der Abstände zwischen dem festen und beweglichen Teile ermöglicht, ohne daß die Gefahr des Überschlagens eintritt. Außerdem wird hierdurch und durch die exzentrische Bewegung der Hohlzylinder M_1 M_2 zu den metallischen Flächen B_1 B_2 eine gleichmäßige Skala erzielt. Wegen der höheren Dielektrizitätskonstante des Öls gegenüber Luft wird ferner eine stärkere Kraftwirkung erzielt.

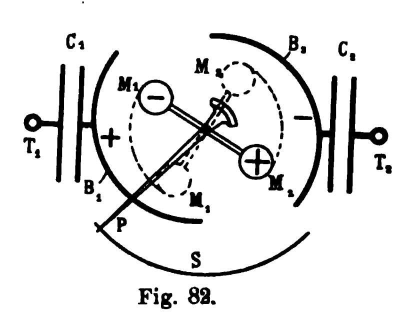


Fig. 82.

Die Hohlzylinder des beweglichen Teiles bewirken, daß ihr Gewicht durch die Schwimmerwirkung nahezu aufgehoben und die Reibung und Abnutzung in den Lagern bedeutend verringert wird. Meßgeräte dieser Art können für Spannungen bis 200 000 Volt gebaut werden. Bei Spannungen von 25 000 bis 50 000 Volt sind beide oder einer der Kondensatoren kurzgeschlossen.

68. Statisches Voltmeter von Ayrton & Mather.

Dieses Voltmeter beruht auf das allen elektrostatischen Spannungsmessern gemeinsame Prinzip der Anziehung bzw. Abstoßung zweier Leiter, von denen der eine fest und der andere beweglich ist und welche mit den beiden Punkten verbunden sind, deren Potenzialdifferenz gemessen werden soll.

Die Systemanordnung ist aus Fig. 83 und 83a ersichtlich: die bewegliche Nadel B besteht aus zwei konzentrisch zur Achse gebogenen Aluminiumblechen AA, die mit der Drehachse durch die leichten Arme D verbunden sind; die Achse ist, wie üblich, mit Stahlspitzen versehen und in Edelsteinen gelagert. Einer der drei Arme D besitzt eine Verlängerung, bestehend aus einer dünnen Kupferscheibe S, welche sich beim Zeigerausschlag, innerhalb der Pole eines permanenten Magneten M dreht und dadurch die Dämpfung erzeugt. An dieser Kupferscheibe ist gleichzeitig der Zeiger befestigt. Das Instrument erhält durch diese Anordnung eine verhältnismäßig große Empfindlichkeit und ist gut gedämpft. Die feststehenden Metallplatten J, die an dem Arm H leitend verbunden sind, haben eine derartige Gestalt, daß es möglich ist, der Skala einen bestimmten Charakter zu geben und zwar entweder mit einer gleichmäßigen oder an einem bestimmten Punkt auseinander gezogenen Einteilung. Vom Gehäuse sind diese Platten durch den gerippten Hartgummiblock, an dem sie befestigt sind, isoliert. Um

das Instrument gegen den Einfluß äußerer statischer Fehler, wie sie z. B. beim Putzen des Glases entstehen, zu schützen, ist letzteres mit einem durchsichtigen leitenden Lack überzogen. [1])

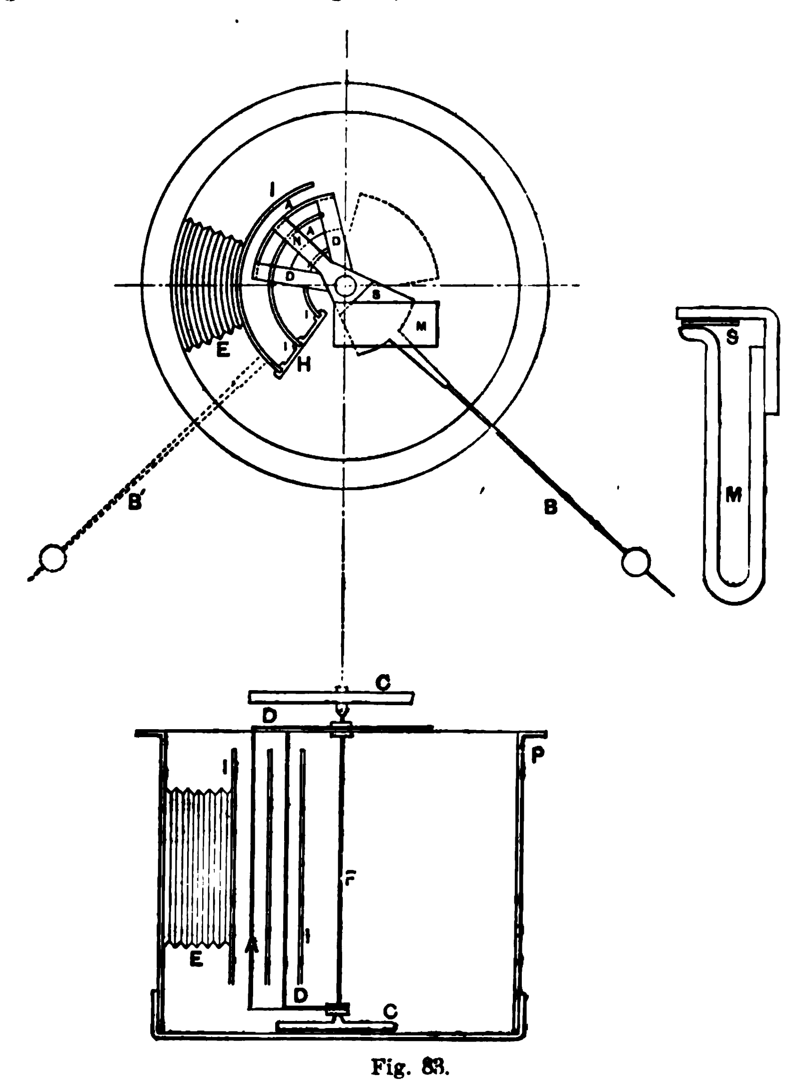


Fig. 83.

64. Statisches Voltmeter von Jona.

In Fig. 84 ist die Konstruktion eines von Jona entworfenen und von der Officina Galileo (Italien) gebauten statischen Hochspannungs-Voltmeters, wiedergegeben, welches sich an die oben beschriebenen elektrostatischen Spannungswagen von Lord Kelvin anlehnt.

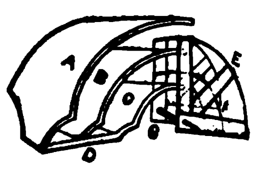


Fig. 83a.

Eine Metallplatte *B* ist vermittelst eines feinen Drahtes an einem Wagebalken aufgehängt und befindet sich in metallischer Verbindung mit der abgerundeten Klemme *P* und einem Metallzylinder *M*. Dieser dient dazu, das Potenzial der Platte *B* mög-

[1]) Prof. Ayrton u. M. Mather, Inst. of E.E. Bd. XXIII, S. 376.

lichst gleichmäßig zu erhalten und vor äußeren elektrostatischen Einflüssen zu schützen. Das Gewicht der Platte *B* ist durch ein Gegengewicht *W* ausgeglichen. Durch Anwendung verschiedener Gegengewichte kann man dem Apparat entsprechend verschiedene Empfindlichkeiten geben. Den zweiten Pol des Meßgerätes bildet eine feststehende Polfläche *A*, durch welche die Polplatte *B* in senkrechter Richtung angezogen wird und so den Wagebalken um seine Achse dreht. Diese Drehung liest man an einer Skala ab, deren Teilung durch Veränderung des Gegengewichtes für verschiedene Meßbereiche geändert werden kann. Der untere Teil des Meßgerätes, welcher durch das Glasgefäß *V* gebildet wird, ist mit isolierendem Öl angefüllt. Dieses Öl dämpft die Bewegungen der Platte *B* vollständig, so daß sich der Zeiger aperiodisch einstellt.

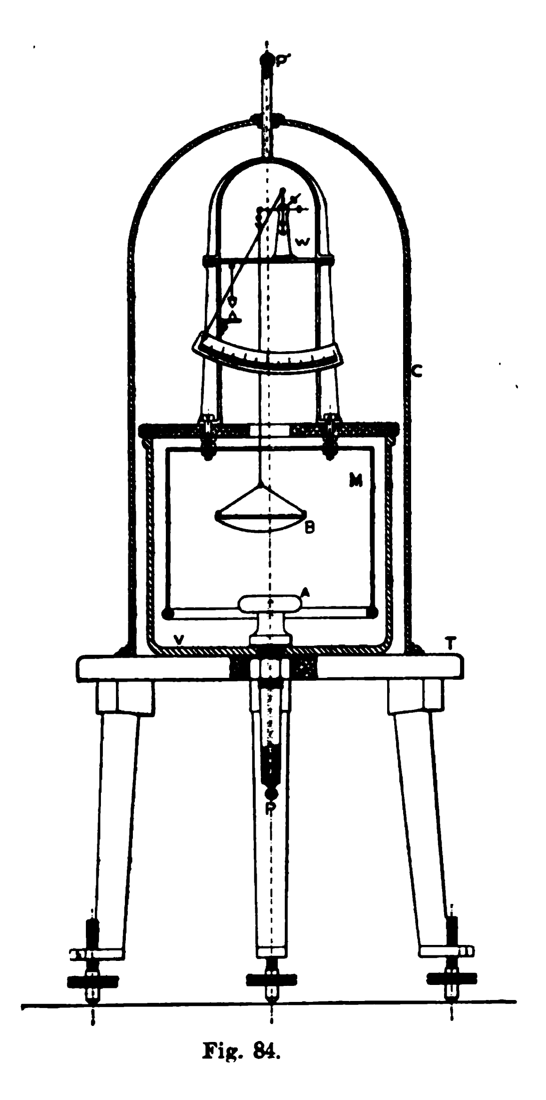


Fig. 84.

Bei den Apparaten für Spannungen über 100000 Volt ragt die Polfläche *A* nicht durch den Boden des Glasgefäßes *V*, sondern wird durch einen äußeren metallischen Belag gebildet, dem gegenüber sich ein zweiter metallischer Belag im Innern des Glasgefäßes befindet.

Die Anziehung der Polplatte *B* ist mit von der Dielektrizitätskonstante des Öles abhängig; ein etwaiges Auswechseln des Öles macht eine Neueichung des Instrumentes erforderlich.

VII. Registrierende Instrumente.

Die registrierenden oder „selbstschreibenden“ Meßgeräte verfolgen den Zweck, ein Gesamtbild über den Verlauf einer gemessenen elektrischen Größe zu geben. Das aufgezeichnete Diagramm läßt nach dem mehr oder minder regelmäßigen bzw. periodischen Verlauf der Kurve auf etwaige Unregelmäßigkeiten im Betriebe schließen und kann dazu dienen, den Wirkungsgrad von Maschinen, Batterien etc. durch Planimetrieren festzustellen, oder aber Elektrizitätszähler, Zeit- und Zählschalter oder sonstige nur zählende Apparate zu kontrollieren. Hauptsächlich leisten die registrierenden Instrumente in Zentralstationen gute Dienste, wo sie zur Kontrolle des Be-

dienungspersonals von Maschinen und Anlagen benutzt werden, was namentlich bei Unglücksfällen oder Betriebsstörungen in rechtlicher Beziehung von Bedeutung ist. Schließlich werden sie bei Abnahmeversuchen verwandt, um Vorgänge, die zu verschiedenen Zeiten und an verschiedenen Orten aufgezeichnet sind, miteinander vergleichen zu können und um bei Meinungsverschiedenheiten zwischen Lieferant und Abnehmer über Arbeitsleistung, Strom- und Wattverbrauch etc. die nötigen zusammenhängenden und über einen bestimmten Zeitraum sich erstreckenden Beobachtungen wiederzugeben. Gegenüber den direkt anzeigenden Meßinstrumenten haben die registrierenden den weiteren Vorteil voraus, daß sie uns von subjektiven Beobachtungsfehlern befreien, wie sie bei plötzlichen Betriebsstörungen und Unglücksfällen leicht vorkommen können. Sie stehen jenen jedoch u. a. hinsichtlich der Empfindlichkeit nach, da sie einen Teil der wirksamen Kraft zur Leistung der Schreibarbeit verbrauchen. Ihre ausgedehnte Verbreitung verbietet sich zuweilen wegen ihres oft recht voluminösen Aufbaues und der z. T. dadurch bedingten hohen Anschaffungskosten (siehe oben **13**).

65. Auswertung der Diagramme.

Wenn oben davon gesprochen wird, daß die aufgezeichneten Kurven planimetriert werden können, so ist dies nur in beschränktem Maße zu verstehen, insofern dieselben bei den meisten bisher bekannten Konstruktionen nicht im rechtwinkeligen Koordinatensystem aufgezeichnet werden; sie müßten vielmehr in ein solches umgezeichnet werden. Dies hängt mit dem zur Registrierung angewandten Meßprinzip selbst zusammen. Die Abszissen (Spannung, Strom, Leistung etc.) sind zwar bei den meisten Registrierinstrumenten vertikale, gerade Linien, allein die Ordinaten (Zeit) sind, wie Fig. 85 zeigt, wegen der Bequemlichkeit der Ablesung zumeist Kreisbögen, die zum Mittelpunkt des Meßsystems konzentrisch verlaufen. Es sind auch Abweichungen von dieser Aufführungsart bekannt geworden. Bei den Registrierinstrumenten von Hartmann & Braun z. B. wird die drehende Bewegung durch geeignete Übertragungsmechanismen in eine geradlinige verwandelt; die Diagramme werden demnach in rechtwinkeligen karthesischen Koordinaten erhalten.

Fig. 85.

Die Hauptbestandteile eines Registrierinstrumentes sind: das Meßgerät, das Schreibgerät und da Uhrwerk. Ein wesentliches Moment bei der sachlichen Beurteilung dieser Instrumente ist ferner die Kuppelungsart der zuerst genannten zwei Bestandteile.

66. Das Meßgerät.

Hinsichtlich des Meßgerätes i t an dieser Stelle nur noch weniges zu sagen, da alle in den vorstehenden Kapiteln behandelten Meßsysteme bei den Registrierinstrumenten angewandt worden sind. Wie schon eingangs erwähnt, wird ein Teil der wirksamen Kraft zur Mitnahme des Schreibgeräts und zuweilen auch zur Überwindung der Reibung zwischen Schreibfeder (Spitze, Bleistift) und Papier verwandt. Hieraus ergibt sich, daß der Stromverbrauch der registrierenden Voltmeter und der Spannungsverlust in den Amperemetern, mit anderen Worten der Eigenkonsum der registrierenden Meßgeräte ein wesentlich höherer ist, als der direkt anzeigenden Instrumente. Für Zentralen ist dieser Nachteil nicht von besonderer Bedeutung, da hierbei

nur je ein Instrument zur Kontrolle der gesamten erzeugten oder abgegebenen Stromstärke und der herrschenden Spannung — allenfalls noch ein Wattmeter für die Gesamtleistung, besonders in Wechselstromzentralen — in Betracht kommen. Der Wattverbrauch dieser drei Registrierinstrumente dürfte jedoch in den meisten Fällen im Vergleich zur Gesamtleistung des Werkes nicht ins Gewicht fallen.

Bei den WESTON-Instrumenten kann ein höherer Wattverbrauch z. T. dadurch vermieden werden, daß man zur Erzeugung des Kraftfeldes einen entsprechend größeren und stärkeren permanenten Magneten verwendet; Polschuhe, Kern und die als Gegenkraft allgemein benutzten Spiralfedern werden alsdann entsprechend robuster konstruiert. Bei den Weicheisen- und elektrodynamischen Systemen besitzt man jedoch kein analoges Mittel. Die Verwendung größerer Eisenmassen zur Erhöhung der Empfindlichkeit der zuerst genannten Instrumente verbietet sich aus den in **26** angegebenen Gründen. Das Kraftfeld, welches bei diesen Systemen von Spulen erzeugt wird, kann nur durch Vermehrung der Windungszahlen verstärkt werden, und diese Vermehrung bringt eben den Eigenkonsum mit sich. Man wird jedoch in den meisten Fällen diesen Wattverbrauch gern in Kauf nehmen, wenn dadurch erreicht wird, daß schon geringere Strom-, Spannungs- oder Leistungsschwankungen registriert, die Meßgeräte also empfindlicher werden.

Die Eichung geschieht empirisch und die Bezifferung des Meßbereiches wird in bestimmten Intervallen auf dem Papierstreifen angebracht. Neuerdings ist man jedoch aus Fabrikationsrücksichten zumal bei den Registrierapparaten mit nicht gleichmäßiger Teilung (Weicheisen-, elektrodynamische, Hitzdraht-Registrierapparate) davon abgegangen, den Papierstreifen selbst entsprechend der Eichung einzuteilen und zu beziffern. Bekanntlich haben diese Systeme die Eigentümlichkeit, daß eine geringe Änderung der zusammenhängenden Bestandteile, etwa der Lage der Spulen gegeneinander, des Eisens, der Ausbalancierung etc., wie sie schon bei der Neuanfertigung und bei einer ev. Reparatur des Apparates vorkommen können, eine Änderung des Charakters der Skala zur Folge hat, die eine Neueichung erforderlich macht. Eine solche würde jedoch bedingen, daß jedesmal die Papierstreifen des Registrierinstrumentes mit der neuen Teilung gedruckt werden; die Apparate würden dadurch oft wesentlich verteuert werden. Man versieht daher die Papierstreifen mit einer gleichmäßigen Teilung und gibt jedem Instrument eine Eichungstabelle oder Korrektionsskala etwa in Form eines Ableselineals bei.

67. Das Schreibgerät.

Man kann bei den selbstschreibenden Meßgeräten im allgemeinen zwei Hauptarten unterscheiden: Instrumente mit absatzweiser und solche mit fortlaufender Aufzeichnung. — Es sind verschiedene Konstruktionen der ersten Art bekannt geworden, von denen hier nur ein Teil beschrieben werden soll. Sie bestehen darin, daß der Zeiger von Zeit zu Zeit gegen das Papier oder der Papierstreifen gegen den Zeiger gedrückt wird, um Zeichen zu erhalten, oder daß der Zeiger auf mechanischem oder elektrischem Wege auf Null zurückgeführt wird, um in einen dort feststehenden Tintenbehälter einzutauchen. Es leuchtet ein, daß die letzte Ausführung zur Entlastung des Zeigers vom Farbbehälter benutzt wird.

68. Registrierinstrument von Féry.

In dieser Weise konstruierte CHARLES FÉRY in Paris DRP. 19056 ein registrierendes Galvanometer, welches ursprünglich in Verbindung mit einem Thermoelement für pyrometrische Zwecke gedacht war (Fig. 86). Vermittelst eines Uhrwerkes wird eine Vorrichtung angetrieben, die in regelmäßig sich

wiederholenden Zeitpunkten ein Papierband anhebt, um es mit einer von der Galvanometernadel getragenen Feder oder dgl. in Berührung zu bringen. Dasselbe Uhrwerk betätigt gleichzeitig einen der beiden schematisch angedeuteten Schalter, s_1 oder s_2, die entweder den Stromkreis unterbrechen, oder die bewegliche Spule kurzschließen oder schließlich der letzteren einen genügend großen Widerstand vorschalten, um den Zeiger auf Null zurückzuführen. Nachdem der Zeiger in der Nulllage angelangt ist, wird der Tintenbehälter t vom Uhrwerk gehoben und die Zeigerspitze taucht ein. Darauf werden wieder die Schalter betätigt und das Spiel wiederholt sich. Der Deutlichkeit wegen ist in der Fig. 86 das Uhrwerk weggelassen. Die Stange a, die den Papierstreifen gegen den Zeiger anhebt, hebt auch gleichzeitig das Tintenfaß t, so daß der Zeitraum zwischen zwei Schaltungen bei s_1 oder s_2 ein genaues Vielfaches der Zeitdauer zweier Aufwärtsbewegungen der Stange a sein muß.

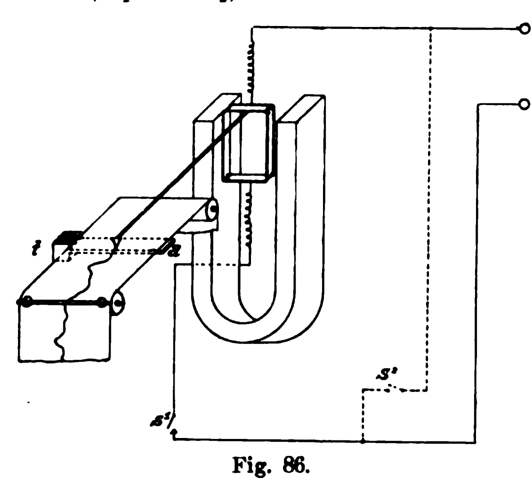


Fig. 86.

69. Registrierinstrument von Paul Braun & Co.

Die Firma Paul Braun & Co., Berlin, bewirkt das Zurückführen des Zeigers auf Null durch mechanische Mittel[1]) und zwar in der Weise, daß der Zeiger durch einen periodisch über das Papier bewegten Arm zu dem Tintenfaß geführt wird. Das Registrieren selbst geschieht dadurch, daß ein vom Uhrwerk betätigter Bügel den Zeiger in bestimmten Zeitintervallen gegen den Papierstreifen drückt. Die Vorrichtung ist an einem Westonsystem angebracht, und das Meßgerät für pyrometrische Zwecke gedacht.


Fig. 87.

Die Rückführung des Zeigers auf Null ist von Siemens & Halske zum Bau von Elektrizitätszählern verwandt worden (ETZ. 1898) indem die zurückgelegten Wege von einem Zählwerk summiert werden (siehe Abtlg. VI). Bei den sonstigen Siemensschen Registrierapparaten mit absatzweiser Registrierung (Fig. 87), geschieht letztere durch einen Fallbügel, der etwa alle 2, 4 oder 12 Sekunden auf den Zeiger drückt und die Stellung des Zeigers auf dem Papierstreifen markiert, ohne daß derselbe in die Nulllage zurückgeführt wird. Die Auslösung des Bügels vermittelt ein Elektromagnet, dessen Wickelung so eingerichtet wird, daß sie entweder von einer Trockenbatterie geringer Zellenzahl oder vom Gleichstromnetz gespeist wird. Die Wahl der Registrier-

[1]) DRP. ang. Nr. 41511. Siehe auch Elektrot. Anzeiger Nr. 76 Jahrg. 1907.

periode und Papiergeschwindigkeit richtet sich nach den im Betriebe vorkommenden Schwankungen, es kann jede Registrierperiode mit jeder Papiergeschwindigkeit kombiniert werden.



Fig. 88.

Für sehr schnell schwankende Größen können die Instrumente mit absatzweiser Registrierung nicht gut verwendet werden; in solchen Fällen empfehlen sich Apparate mit fortlaufender Kurvenaufzeichnung. Wohl das älteste selbstschreibende Meßgerät mit kontinuierlicher Aufzeichnung ist das 1867 von WILLIAM THOMSON als Empfangsinstrument für telegraphische Zwecke konstruierte Registrierinstrument, das unter dem Namen „Syphon Recorder“ System bekannt ist. In einen Tintenbehälter tauchte eine Kapillarröhre ein, die durch einen Faden oder dgl. mit dem messenden System verbunden war. Durch bifilare Aufhängung der Kapillarröhre, wurde letzterer die erforderliche Richtkraft erteilt; gleichzeitig wurden hierdurch Vibrationen erzeugt, um ein Herausspritzen der Tinte aus der Röhre zu bewirken. THOMSON hat gleichzeitig angegeben, daß man Letzteres auch auf elektrischem Wege erreichen kann, indem man die Tinte einerseits und die Metallplatte unter dem Papierstreifen anderseits auf verschiedenem Potential bringt und die Tinte durch die hinüberspringenden Funken mitreißt.

70. Registrierinstrumente von S. & H.

Bei einer weiteren Type eines SIEMENSschen Registrierapparates wird auch ein Funke benutzt, der das Papier an der jeweiligen Stelle des Zeigers durchschlägt. Ein kleiner Funkeninduktor (Fig. 88), der im Kasten des Apparates untergebracht ist, dient zur Erzeugung des Funkens; dieser wird durch einen 4 voltigen Akkumulator gespeist, dem ein Vorschaltwiderstand vorgelegt ist, um den Funkenstrom auf beliebige Stärke einstellen zu können. Das Meßsystem ist im übrigen, wie aus der Figur ersichtlich, das übliche Drehspulensystem für Gleichstrommessungen, doch werden von der Firma auch elektrodynamische Meßgeräte mit derselben Registriervorrichtung ausgerüstet.

Bei dem größten Teil der sonstigen bekannt gewordenen Konstruktionen

416499

von registrierenden Meßgeräten wird die fortlaufende Aufzeichnung dadurch bewirkt, daß das Farbgefäß auf den Zeiger montiert wird oder mit demselben in einer sonstigen Weise gekuppelt wird. Von Zeit zu Zeit muß das Tintengefäß mit der erforderlichen Farbe gefüllt werden. Ganz allgemein be-

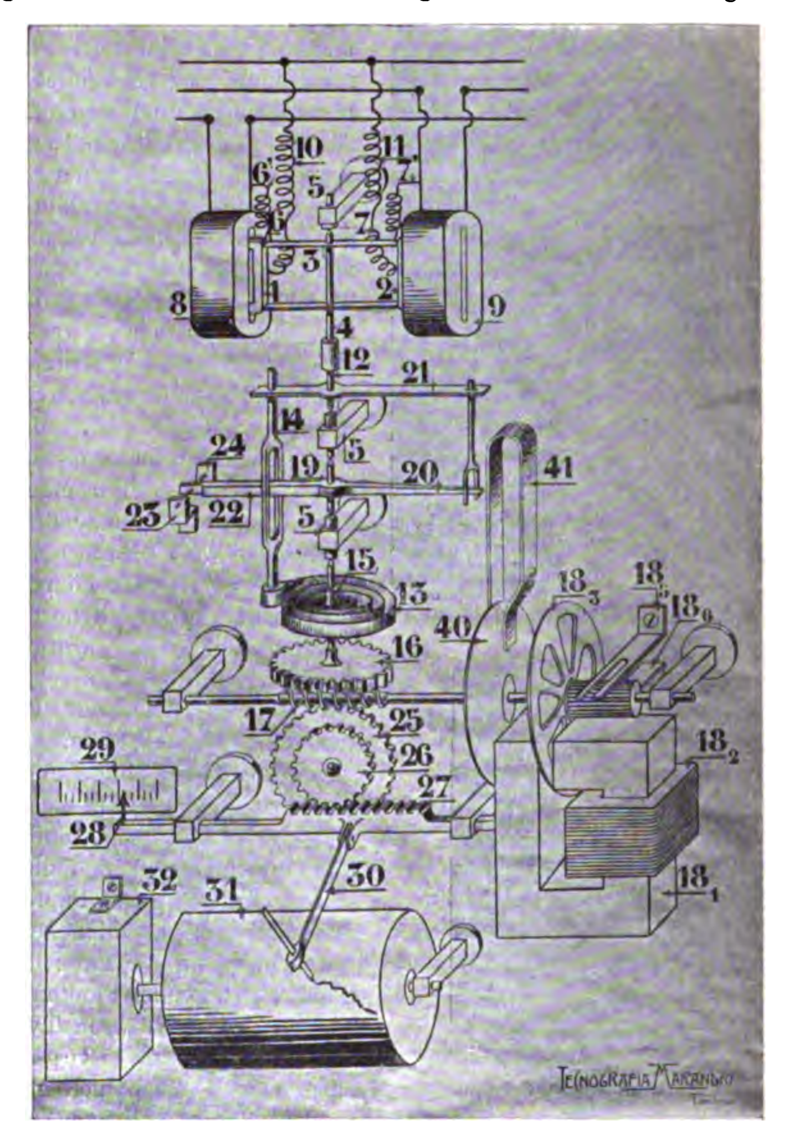


Fig. 89.

sitzt diese Anordnung neben dem Übelstand der leichten Verletzbarkeit des Systems bei unvorsichtiger Bedienung den Nachteil, daß das messende System durch das Farbgefäß und das Schreibwerkzeug belastet ist. Diese Belastung ist außerdem nicht konstant, da der auf das System ausgeübte Druck bei gefülltem Gefäß ein anderer ist, als wenn dieses fast leer ist. Dieser Fehler wird bei den Instrumenten genannter Art zum Teil dadurch eliminiert, daß man die wirksame Kraft des Meßgeräts möglichst stark zu gestalten sucht, mithin das ganze System größer baut.

71. Das Uhrwerk.

Bezüglich des Uhrwerkes sei an dieser Stelle nur erwähnt, daß es möglichst langzeitig sein muß, damit es im Betriebe in möglichst weiten Zwischenräumen aufgezogen zu werden braucht. Daß es die Zeit exakt anzeigen muß, ist selbstverständlich. Die richtige Wahl der Papiergeschwindigkeit ist

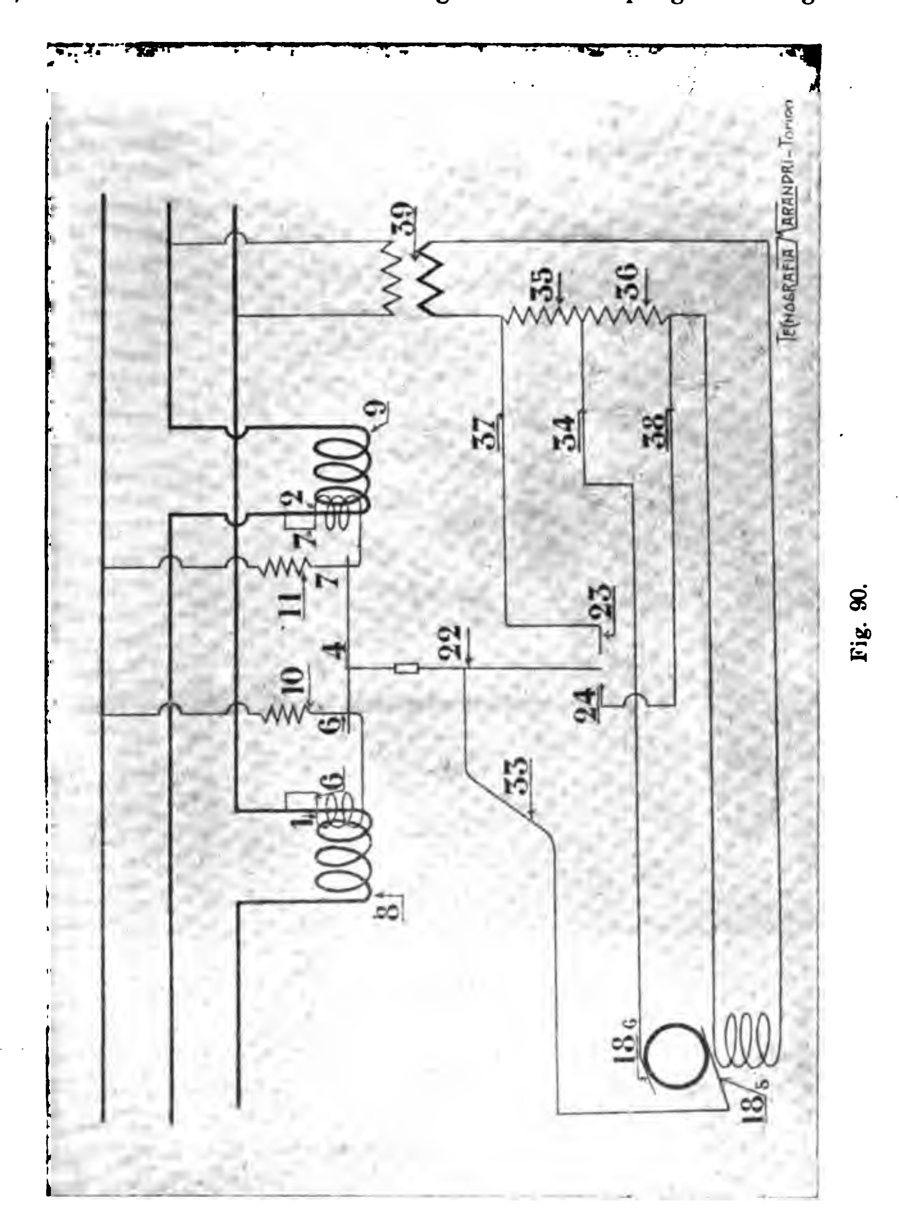


Fig. 90.

ebenso wichtig wie die richtige Wahl des Meßbereiches für Stromstärke oder Spannung und hängt natürlich von dem Verwendungszweck ab. Für Betriebsinstrumente dürfte die Geschwindigkeit von 1 mm pro Minute die Gebräuchlichste sein. Ausgeführt werden solche von 0·5 bis 150 m/m pro Minute.

72. Registrierendes Relay-wattmeter von Olivetti.

Das registrierende Relayswattmeter von Camillo Olivetti (entworfen von Arcioni) unterscheidet sich von allen anderen selbstschreibenden Meßgeräten durch seine eigenartige Konstruktion und ins-

besondere durch die größeren Kräfte, die hier zur Wirkung kommen. Es gehört zur Klasse der Instrumente mit fortlaufender Aufzeichnung und hat unter anderem auch den Vorteil, daß die Leistungskurve in rechtwinkeligen Koordinaten aufgezeichnet wird. Das Schreibgerät ist getrennt vom Meßsystem aufgebaut und wird von einem besonderen Motor angetrieben. Die Anordnung ist aus Fig. 89 ersichtlich, welche die Konstruktion eines Wattmeters zur direkten Messung und Aufzeichnung der Leistung eines ungleich belasteten Drehstromnetzes darstellt. Das Wattmeter beruht auf dem elektrodynamometrischen Prinzip; 8 und 9 sind die festen, 1 und 2 die beweg-

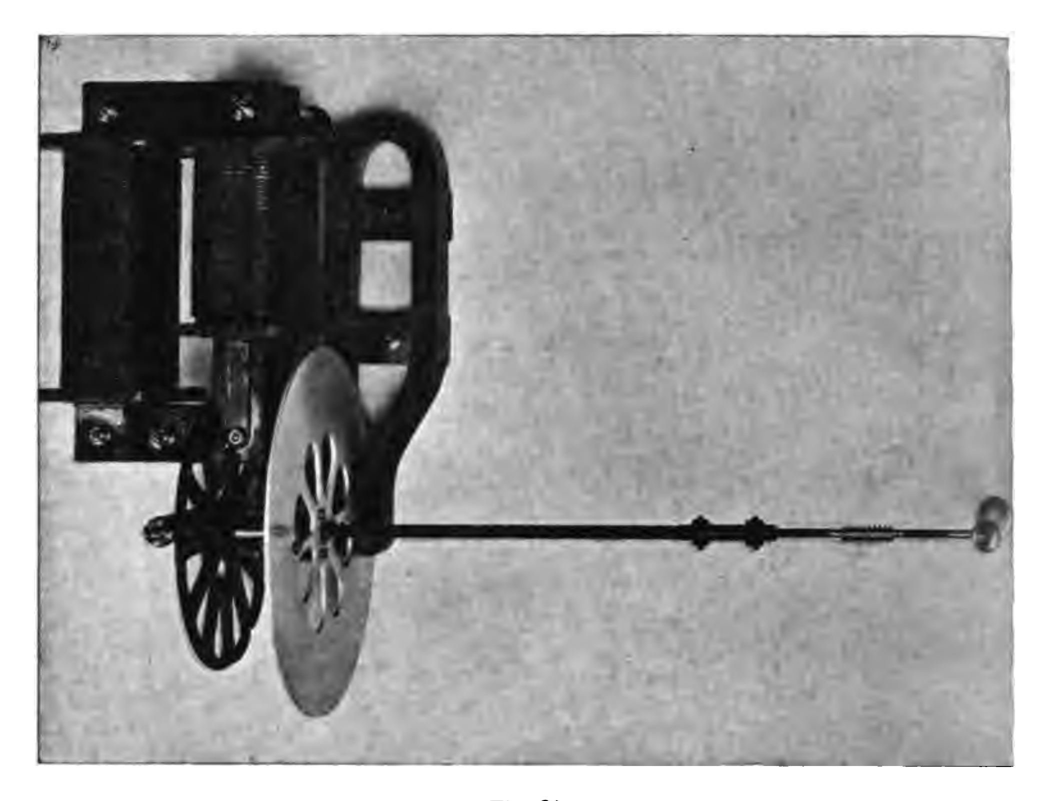


Fig. 91.

lichen Spulen. Letztere sind auf der Achse 4 befestigt, mit der zugleich das eine Ende der die Gegenkraft liefernden Spiralfeder 13 fest verbunden ist. Das andere Ende der Spiralfeder ist an einem geschlitzten Arm 14 befestigt, welcher beim Ausschlag des Instrumentes die Kontaktstange 22 mitnimmt; letztere führt den Strom dem kleinen Elektromotor zu, indem sie an den Punkten 23 bzw. 24 Kontakt macht. Die Achse des Motors ist in ihrer Verlängerung als Schnecke ausgebildet, die einerseits das Zahnrädchen 16, anderseits das Zahnrad 25 antreibt. Das auf derselben Achse sitzende Zahnrad 26 greift in die Zahnstange 27 ein, an der sowohl der Registrierarm, sowie auch der Zeiger befestigt ist. Das Aufzeichnen geschieht auf einer Trommel 31, die in üblicher Weise von dem Uhrwerk 32 angetrieben wird. Die Schaltung des Instrumentes selbst sowie auch diejenige des Motors ist 'g. 90 ersichtlich. Erfolgt eine Drehung der beweglichen Spulen nach

der einen Richtung entsprechend der zu messenden Leistung, so gibt die Stange 22 an einem der Punkte 23 oder 24 Kontakt; der Motor setzt sich in Bewegung und bringt mit Hilfe der Spindel und der angedeuteten Räder die Zahnstange 27 und somit den Registrierarm und den Zeiger zum Ausschlag. Die Registrierung erfolgt solange, bis das Gleichgewicht vermittelst der Spiralfeder wieder hergestellt ist und die Kontaktstange sich vom Kontaktpunkt entfernt hat. Bei der Bewegung der Spulen in entgegengesetzter Richtung wird der Motor reversiert. Als Dämpfung wird die übliche Wirbelstrombremse, bestehend aus dem permanenten Magneten 41 und der Scheibe 40, benutzt. In Fig. 91 ist der Motor und die Dämpferanordnung wiedergegeben. Der Wattverbrauch des Instrumentes wird von der erzeugenden Firma wie folgt angegeben:

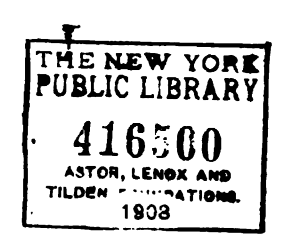
in den festen Spulen 18 Watt,
in den beweglichen Spulen 2·5 Watt bei ca. 100 Volt,
im Motor 30—40 Watt.

Bei dem direkt anzeigenden Wattmeter fällt das Zahnrad 26, ferner natürlich die Zahnstange, die Trommel und das Uhrwerk fort und der Zeiger wird am Rädchen 25 befestigt; der Ausschlag erfolgt über einen Winkel von 300 Grad.

Namenregister.

(Zu Abteilung 5.)

(Die angegebenen Zahlen bedeuten die Seiten.)



Sechste Abteilung.

Die Elektrizitätszähler

bearbeitet

von

R. Ziegenberg.

Vorwort zur sechsten Abteilung.

Die nachstehende Darstellung über Elektrizitätszähler kann auf Vollständigkeit keinen Anspruch machen, aus dem doppelten Grunde, da der hierzu billigerweise zugemessene Raum in keiner Weise ausreichen würde. dann, weil sich in der Herstellung dieser Meßapparate wohl eine Vielheit der Konstruktionen aber eine nur beschränkte Anzahl von Normaltypen herausgebildet hat, die die Praxis als allein lebensfähig erwiesen hat, und von denen die verschiedenen Ausführungen der einzelnen Firmen nur in bestimmten Punkten abweichen. Es genügt daher für den vorliegenden Zweck, die wichtigsten Vertreter der einzelnen Gattungen des Elektrizitätszählers, auf elektrolytischem Prinzip, des Pendelzählers, des Motorelektrizitätszählers, u. a. zu beschreiben und auf etwaige bemerkenswerte Abweichungen sonst ähnlicher Konstruktionen hinzuweisen. Dieser Abschnitt des „Handbuches der Elektrotechnik" soll daher nur eine Orientierung über die angewendeten Konstruktionsprinzipe und ihrer wichtigsten praktischen Ausführungsformen geben, mit besonderem Hinweis der beim Entwurf eines Elektrizitätszählers zu beobachtenden allgemeinen wie besonderen technischen Gesichtspunkte, ohne jedoch im mindesten ein Lehrbuch der gesamten heute hergestellten Zählerkonstruktionen bilden oder gar eine Anleitung für die Anfertigung eines solchen Meßapparates geben zu wollen. Es ist in der Einleitung ausdrücklich darauf hingewiesen, mit welchen Schwierigkeiten verschiedenster Natur die Schaffung einer neuen Type oder auch nur die Anbringung einer wesentlichen Verbesserung an einer bestehenden Konstruktion verknüpft ist. Hierzu ist neben theoretischen Kenntnissen vor allem reiche praktische Erfahrung vonnöten, wie sie nur durch die andauernde Beschäftigung mit dem Bau und Betrieb dieser Instrumente erworben werden können. Zur klaren Einsicht dieser Schwierigkeiten und zum Verständnis der heute praktisch verwendeten Elektrizitätszähler ist jedoch eine genaue Kenntnis der Entwickelung dieses Meßapparates von großem Vorteil, und ist deshalb dem historischen Teil ein verhältnismäßig großer Raum zugemessen worden. Noch genaueres über ältere Konstruktionen, namentlich über frühere Ausführungsformen heutiger Zählertypen findet man in früheren Publikationen über denselben Gegenstand, nämlich:

„Die elektrischen Verbrauchsmesser" von E. DE FODOR 1891, XLIII Bd. der Elektrotechnischen Bibliothek von A. Hartlebens Verlag, Wien-Leipzig.

„Elektrische Verbrauchsmesser der Neuzeit“ von I. ZACHARIAS 1901. Wilh. Knapp, Halle a. S.

„Über Motorelektrizitätszähler“ von G. HUMMEL, 1898 Bd. I, Heft 9 der Sammlung elektrotechnischer Vorträge von Prof. Dr. E. VOIT. Verlag von F. Enke, Stuttgart.

„Konstruktion und Prüfung der Elektrizitätszähler“ von A. KÖNIGSWERTHER, 1903, Hannover, Verlag von Gebr. Jänecke.

Wenn vorstehenden Überlegungen zufolge in dem beschreibenden Teile nur die Fabrikate einzelner Firmen ausführlich beschrieben sind, während ähnliche andere Konstruktionen nur erwähnt sind, so ist für diese Auswahl bei dem Verfasser nur der Gesichtspunkt maßgebend gewesen, als Beispiele solche Konstruktionen zu wählen, welche die charakteristischen Eigenschaften der betreffenden Type am deutlichsten aufweisen und sich nach Kenntnis des Verfassers in ausgedehnter praktischer Anwendung befinden. Irgendeine Kritik über den Wert oder Unwert der nicht so eingehend beschriebenen Zähler soll und kann hierin nicht erblickt werden.

Bei den Abbildungen kamen die in den amtlichen Bekanntmachungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt enthaltenen klaren Darstellungen der betreffenden zu der amtlichen Beglaubigung zugelassenen Zählertypen in Schaltung und konstruktiver Ausführung sehr zu statten. So sind die Figuren 22—31, 38—43, 53, 54, 66—68, 74—77, 80—83, 104, 107—109, 120—127, 131, 132, 143—145 diesen amtlichen im Verlage von Jul. Springer, Berlin erscheinenenden Systembeschreibungen entnommen. Für andere Abbildungen konnten z. T. bereits vorhandene Bildstöcke aus Publikationen der betreffenden Firmen in der E.T.Z. und der Zeitschr. für Beleuchtungswesen benutzt werden, was hinsichtlich der Figuren 2, 3, 32, 70, 90—93, 97, 98, 110—117, 153—156, 167, 186—190 zutrifft.

Für eine große Anzahl von Figuren stellten schließlich die verschiedenen Firmen die Stöcke der in ihren Listen und anderweitigen Bekanntmachungen enthaltenen Abbildungen für den Abdruck bereitwilligst zur Verfügung, ebenso wie sie mich für die Beschreibung der neueren Ausführungsformen mit sehr reichhaltigem Material unterstützten. Ihnen allen sage ich nochmals an dieser Stelle meinen verbindlichsten Dank.

Berlin im Mai 1907.

Der Verfasser.

Inhaltsverzeichnis.

Einleitung.

I. Historische Entwickelung.

II. Einteilung der Elektrizitätszähler.

III. Die heutigen Ampere- und Wattstundenzähler.

A. Elektrolytische Zähler.

Seite

Praktische Ausführungsformen.

B. Aus mechanischem Uhrwerk und elektrischem Mefsinstrument bestehende Uhr.

C. Pendelelektrizitätszähler.

Der Aronzähler.

D. Motorelektrizitätszähler.

a) Auf magnet-elektrischem Prinzip beruhende Amperestundenzähler.

Allgemeines.

Der O'K-Zähler.

Amperestundenzähler mit Bremsung.

Seite

b) Auf dynamometrischem Prinzip beruhende Gleich- und Wechselstrom-Wattstundenzähler mit und ohne Eisen.

1. Rotationszähler.

Theorie und Allgemeines.

Praktische Ausführungsformen.

2. Oszillationszähler.

c) Auf Mehrphasen-Induktionsprinzip beruhende Wechselstrom-Wattstundenzähler.

1. Einphasenzähler.

Theorie und Allgemeines.

Der Induktionszähler.

Praktische Ausführungsformen.



Einleitung.

Bei dem Verkauf von elektrischer Energie, wobei die elektrische Zentrale der Lieferant, der Stromverbraucher der Käufer ist, bildet der Elektrizitätszähler das Mittelglied, den Maßstab, welcher die Quantitat der verbrauchten Energie mißt und für die Höhe des dafür zu zahlenden Preises maßgebend ist. Es hat sich daher mit der wachsenden Anwendung des elektrischen Stromes als notwendig herausgestellt, diesen Maßstab wie alle anderen, welche im täglichen Leben gebraucht werden, einer staatlichen Kontrolle und Eichung zu unterwerfen. Die für die Herstellung und praktische Benutzung der Elektrizitätszähler maßgebenden gesetzlichen Bestimmungen sind im Anhang enthalten. Es ergeben sich aus dieser Eigenschaft des Elektrizitätszählers sofort eine Reihe von wichtigen Bedingungen, denen derselbe zu genügen hat. Da bei dem Verkauf eines jeden Gegenstandes stets die zweifachen Interessen des Verkäufers und Käufers nur durch eine streng unparteiische Messung oder Wägung gewahrt werden können, so ist auch für den Elektrizitätszähler die wichtigste Bedingung, daß er die betreffende elektrische Größe möglichst genau mißt. Wir werden später sehen, daß, wie auch im Gesetz vorgesehen ist, die Konstruktion dieser diffizilen Instrumente und die besonderen Bedingungen, unter denen sie jeweilig zu arbeiten haben, hierbei verhältnismäßig hohe Abweichungen, in Prozenten ausgedrückt, als zulässig erfordern, wie dieselben gewöhnlich bei anderen mechanischen wie elektrischen Instrumenten nicht vorhanden sind. Der Elektrizitätszähler ist daher auch heute noch ein verhältnismäßig ungenaues und unvollkommenes Instrument und wird infolgedessen noch unablässig an seiner Vervollkommnung gearbeitet. Der Zähler soll die betreffende Genauigkeit jedoch nicht nur im Anfang, kurz nach der Ablieferung aus der Fabrik aufweisen, sondern die gleiche oder höchstens nur ein wenig von der anfänglichen Genauigkeit abweichende dauernd geben. Wir werden im Folgenden sehen, daß es auch betreffs dieses Punktes mit den meisten Konstruktionen noch übel bestellt ist. Man hat auch in dem betreffenden Gesetz diesen tatsächlichen Verhältnissen wohl oder übel Rechnung tragen müssen, indem man bei der Genauigkeit zwei Arten unterscheidet, einmal die bei der Ablieferung und ersten Eichung zu fordernde, dann die etwas größere Toleranz enthaltende dauernde Verkehrsgenauigkeit. Es sind besonders die Gleichstrom-Motorzähler, die trotz ihrer sonstigen grundsätzlichen

1. Schwierigkeiten des Elektrizitätszähler-Problemes.

Einfachheit hier andauernd allen Interessenten, Konstrukteur, Zentrale wie Konsumenten große Sorgen machen, indem es schwer ist, bei denselben größere Verschlechterungen der Genauigkeit im dauernden Gebrauch zu vermeiden.

Den staatlich anerkannten elektrischen Einheiten entsprechend soll der Zähler fernerhin die Energie direkt in denselben oder einem Vielfachen derselben angeben, d. h. ohne weitere Berechnung. An und für sich wäre es nämlich nicht erforderlich, und lieferten tatsächlich die ersten Zähler elektrischer Energie die gesuchte Größe nicht direkt, sondern mußte man dieselbe erst je nach der Natur des Intrumentes durch Rechnung, bei den ersten elektrochemischen Zählern nach dem elektrolytischen Prinzip sogar erst durch Wägung der betreffenden Metallplatten indirekt gewinnen. Heute geht man so weit, die betreffende elektrische Größe nicht nur direkt in einer ganzen Zahl ausgedrückt, durch ein Zahlwerk mit springenden Ziffern zu verlangen, ja neuerdings soll der Apparat wenn möglich noch die kurze Rechnung, Multiplikation der betreffenden Kilowattstundenzahl mit dem Einheitspreis der betreffenden Zentrale, selbst ausführen und den Gegenwert der verbrauchten elektrischen Energie direkt in Mark und Pfennig, oder dem Gelde des betreffenden anderen Landes angeben.

Wie bemerkt ist die Hauptbedingung eines jeden elektrischen Zählers möglichst hohe Genauigkeit oder Empfindlichkeit in elektrischer und mechanischer Beziehung. Diese hohe Empfindlichkeit, welche namentlich bei schwacher Belastung des Zählers eine möglichst große sein soll, um die prozentuale Genauigkeit eben bei diesen schwachen Belastungen nicht zu schlecht werden zu lassen, darf jedoch nicht soweit getrieben werden, bzw. müssen entsprechende Gegenmaßregeln vorgesehen sein, daß der Zähler in stromlosem Zustande keinen Leerlauf zeigt. Es ist dies der schwerwiegendste Nachteil des Zählers in den Augen des Konsumenten. Um diesen unerwünschten Leerlauf grundsätzlich auszuschließen, ist man meistens gezwungen, irgendwelche Vorkehrungen zu treffen, welche den Zähler erst bei einer bestimmten Mindestbelastung, meistens $^1/_2$—1 Prozent der gesamten Belastung anlaufen lassen. Der Leerlauf wird daher auf Kosten der Anfangsempfindlichkeit beseitigt. Die Empfindlichkeit, diese Grundbedingung eines jeden Meßapparates, erfährt jedoch bei dem Elektrizitätszähler noch nach verschiedenen anderen Richtungen eine weitere Beeinträchtigung. Es ist bekannt, daß man die Genauigkeit mechanischer Instrumente durch eine besonders sorgfältige Ausführung bedeutend steigern kann. Abgesehen nun davon, daß hierbei der Kostenpunkt bei einem Massenartikel eine gewisse Grenze zieht, ist dies weiterhin nur bis zu einem gewissen Grade vereinbar mit der erforderlichen mechanischen Stabilität und Solidität der Ausführung, wie sie der Zähler unter allen Umständen besitzen muß. Es ist bekannt, daß sehr empfindliche Meßinstrumente mechanischer wie anderer Natur besonders für den Transport gesichert sein müssen, um bestimmte Teile, wie Schneiden, Spitzen oder dgl. nicht zu beschädigen. Der Elektrizitätszähler, der in Hunderten von Exemplaren aus der Fabrik nach den verschiedensten Richtungen versandt wird, bedarf dieser Transportfähigkeit in hohem Maße, und sind tatsächlich bestimmte Konstruktionen nicht zum Mindesten an dieser Bedingung gescheitert, d. h. trotz sorgfältigster Verpackung kam ein zu hoher Bruchteil beschädigt an der Gebrauchsstelle an. Es ist klar, daß diese Gefahr um so größer ist.

je mehr und je empfindlichere Teile wie Achsen, Spitzen, Federn, elektrische Kontakte etc. der Apparat besitzt.

Die mechanische Konstruktion des Apparates soll jedoch nicht nur dem auf dem Transport vorkommenden mechanischen Beanspruchungen gegenüber genügend widerstandsfähig sein, sondern in noch höherem Maße den verschiedenen bei dem praktischen Gebrauch des Zählers auftretenden Einwirkungen mechanischer und anderer Natur genügend standhalten. Es ist bekannt, daß der Elektrizitätszähler meist an solchen Orten aufgehangen oder anderweitig angebracht wird, welche für sein regelmäßiges Arbeiten gerade nicht hervorragend günstig sind. Man nimmt daher heute schon bei der Konstruktion des Apparates darauf Rücksicht, daß derselbe durch dauernde Erschütterungen, wenn nicht allzu kräftiger Natur, durch Feuchtigkeit, Staub, mäßige Temperaturschwankungen nicht wesentlich in seinem regulären Gang beeinflußt wird. Hierzu ist wieder erforderlich, daß allzu empfindliche Teile, wie haarscharfe Spitzen, Schneiden und dgl. entbehrlich sein müssen, und man mit mehr abgerundeten und dem mechanischen Verschleiß weniger unterworfenen Spitzen, Zapfen etc. sein Auskommen findet. Letztere geben dann allerdings eine weniger hohe Empfindlichkeit.

Da in dem Zähler jedoch nicht nur mechanische, sondern auch elektrische und magnetische Kräfte wirksam sind, so muß bei der Ausführung weiterhin darauf Bedacht genommen werden, daß der Gang des Apparates nicht von außen durch fremde elektrische oder magnetische Einwirkungen unzulässig beeinflußt werden kann. Diese Beeinflussung ist in zweifacher Weise möglich, durch in der Nähe des Apparates verlaufende elektrische Ströme des eigenen Netzes, sodann in böswilliger Absicht mittelst fremder Ströme oder Magnete. Bestimmte Konstruktionen sind gerade daraufhin entworfen, daß durch astatische Ausführungen des elektrischen Systems solche Beeinflussungen selbst in allernächster Nähe des Apparates ohne wesentlichen Einfluß bleiben. Schließlich sind sogar besondere Vorkehrungen erdacht und wohl auch ausgeführt worden, welche eine derartige unzulässige Beeinflussung des Zählers den kontrollierenden Beamten erkennen lassen.

Gebietet diese mechanische Rücksicht, daß die Empfindlichkeit nicht zu sehr auf die Spitze getrieben werden darf, so sind dagegen, von der vorerwähnten Hauptbedingung, der größtmöglichen Genauigkeit abgesehen, wieder andere Bedingungen direkt wirtschaftlicher Natur vorhanden, welche die Erhöhung der Empfindlichkeit des Zählers im Interesse eines möglichst geringen Eigenverbrauches als sehr wünschenswert, ja notwendig erscheinen lassen, entsprechend dem allgemeinen Prinzip, daß irgend ein Meßapparat oder Instrument die zu messende Größe möglichst wenig ändern, beeinflussen oder gar verbrauchen soll. Muß nun diese Änderung, im Fall des Elektrizitätszählers der Verbrauch der zu messenden elektrischen Energie selbst, gar noch von einer der beiden Parteien, dem Käufer oder Verkäufer bezahlt werden, so ist praktisch um so mehr Veranlassung vorhanden, diesen Eigenverbrauch nach Kräften zu vermindern. Ein Zähler verbraucht nun wie jeder andere mechanische Apparat um so weniger Kraft für die eigene Bewegung, je empfindlicher die in Bewegung zu setzenden Teile ausgeführt sind, je geringer die mechanische Reibung ist. An und für sich ist zur Erzielung großer Genauigkeit im Verein mit Sicherheit des Funktionierens das Vorhandensein einer großen bewegenden Kraft sehr erwünscht. Diese den Zähler bewegende Kraft ist aber der zu messende elektrische Strom selbst,

und es leuchtet ohne weiteres ein, daß zu dieser Messung des Stromes ein möglichst geringer Bruchteil desselben ausreichen muß. Es ist dies ein wesentlicher Unterschied zwischen dem Elektrizitätszähler und anderen ihm verwandten Meßinstrumenten, wie z. B. Gas- und Wassermessern. Bei den letzteren wird der Zähler durch den natürlichen Druck der Anlage getrieben, wie derselbe überhaupt zum Betriebe derselben erforderlich ist. Der Zähler verbraucht dabei also von der zu messenden Größe, dem Gas- oder Wasserquantum, selbst nichts. Der in einer elektrischen Anlage vorhandene Druck dagegen, die Spannung, bildet einen Teil der gesuchten Größe selbst, wie schon aus der Bezeichnung Watt = Voltampere hervorgeht. Dieser Verbrauch von Elektrizität ist ein doppelter. In den meisten Zählern, den Wattstunden-Zählern, durchfließt einmal der Hauptstrom gewisse Stromspulen, die Hauptstromwindungen, und erleidet hierbei, namentlich bei voller Belastung des Zählers nicht unerheblichen Spannungsabfall. Die für die betreffende Anlage oder Hausanschluß zulässige Maximalbelastung findet aber meistens nur vorübergehend statt, und ist daher jener in den Starkstromspulen auftretende Verlust ohne große praktische Bedeutung. Die Nebenschlußwindungen liegen dagegen parallel zu dem Stromnetz an und stehen dauernd unter Strom. Dieser Nebenschlußverbrauch ist es daher vornehmlich, den man mit allen Mitteln zu vermindern bestrebt sein muß. Bei einzelnen Zählern, den Ampere-Stundenzählern, kommt nur der in den Hauptstromwindungen bei stattfindendem Verbrauch von Elektrizität auftretende Verlust in Frage, bei gewissen anderen Zählern, den Zeitzählern, oft nur der Nebenschlußverbrauch. In jedem Fall wird man durch große Empfindlichkeit des Apparates den eigenen Verbrauch an elektrischer Energie auf ein Minimum herabzudrücken suchen, da hieran Konsument wie Zentrale ein gleiches Interesse haben.

Daß man jedoch in diesem Bestreben, der Erhöhung der Empfindlichkeit des Apparates aus anderen Gründen, Vermeidung von Leerlauf und Erzielung einer genügenden mechanischen Solidität nicht zu weit gehen darf, sahen wir bereits. Eine genügende mechanische Kraft des Zählers, die also wiederum einen bestimmten Eigenverbrauch zur Folge hat, wird man weiterhin und hauptsächlich im Interesse eines andauernd gleichmäßigen und sicheren Funktionierens des Zählers verlangen müssen, da dies im praktischen Betriebe zur Aufrechterhaltung dauernd guter Beziehungen zwischen Zentrale und Konsumenten, der Grundlage jeder Rentabilität, von größter Bedeutung ist. Man rechnet oft, um die Wichtigkeit des Eigenstromverbrauches von Elektrizitätszählern darzulegen, den in einer größeren Zentrale von sämtlichen Zählern während eines Jahres verbrauchten Geldwert der Elektrizität aus. Diese absolut genommen nicht unbeträchtliche Summe stellt jedoch im Vergleich zu anderen Ausgaben einer Zentrale, insbesondere zu den unvermeidlichen Verlusten im praktischen Betriebe einer solchen wie durch unregelmäßiges Aufschütten von Kohle, Stromverlusten in den Kabeln und bei Erdschlüssen einen so geringen Bruchteil dar, daß die von den einzelnen Fabriken angepriesene Geringfügigkeit des Stromverbrauches ihrer Zähler bis zu einem gewissen Grade nur vom Standpunkt der Reklame aus zu bewerten ist. Namentlich wenn man die Kosten in Rechnung zieht, die bei übertrieben empfindlichen Zählern infolge leichterer Beschädigungen beim Transport und infolge häufigerer Reparaturen im Gebrauch derselben erforderlich werden, so ist es einleuchtend, daß man allerdings den Stromverbrauch aus allgemeinen Gründen nach Möglichkeit gering halten, daß man aber

denselben gerade im Interesse der gesamten Unterhaltungskosten eines Zählers nicht unter eine gewisse Grenze herabdrücken soll, um nicht das sichere Funktionieren des Apparates zu gefährden und an Reparaturen mehr auszugeben als man in verschiedenen Jahren an Strom sparen kann.

Diese für den praktischen Wert des Zählers sehr bedeutsame Betriebssicherheit führt uns auf die weitere allgemeine Forderung, daß ein Zähler möglichst einfach sein soll. Diese Einfachheit der Konstruktion wird eine Hauptbedingung durch Berücksichtigung des für die ausgedehntere Anwendung praktisch ausschlaggebenden Preises. Da der Zähler zufolge seiner Bestimmung unbedingt als Massenartikel herzustellen ist, so muß bei dem Entwurf desselben darauf Rücksicht genommen werden, daß sich die einzelnen Bestandteile in großen Mengen, nach Normalteilen, Lehren einfach und billig herstellen und zu dem Gesamtapparat leicht zusammensetzen lassen, in ihrem Zusammenbau aber trotzdem ein sicheres und genaues Arbeiten gewährleisten. Eine möglichst einfache Konstruktion wird daher in gleicher Weise durch das erforderliche sichere Arbeiten des Zählers, wie durch seine Billigkeit gefordert.

In enger Verbindung hiermit steht die weitere praktische Forderung, daß der Zähler im Betriebe möglichst wenig Bedienung erfordern soll, und wenn dieselbe schon nicht entbehrlich ist, daß sie dann in einfacher Weise und auch von wenig geübter Seite ausgeführt werden kann. Die in der ersten Zeit verwendeten elektrolytischen und mit einem mechanischen Uhrwerk versehenen Zähler waren in dieser Hinsicht wenig befriedigend. Bei den neueren Zählern fällt eine besondere Bedienung fast durchgehends weg.

Diese Einfachheit und Billigkeit der Konstruktion widerspricht allerdings teilweise wiederum den vorstehend angegebenen der Empfindlichkeit, des geringen Stromverbrauches und des genügend sicheren Funktionierens des Apparates. Denn wollte man diesen Erfordernissen aufs Äußerste nachkommen, so würde man bald zu Konstruktionen kommen, welche weder einfach noch infolgedessen billig in Massenfabrikationen herzustellen wären.

Wie aus diesen Überlegungen hervorgeht, sind die von einem modernen Elektrizitätszähler zu erfüllenden Bedingungen so mannigfache und einander zum Teil widersprechender Natur, daß die Konstruktion und Fabrikation eines Elektrizitätszählers eine große Summe von Kenntnissen und Fähigkeiten der verschiedensten Natur erfordert, wie sie meistens nicht in einer Person vereinigt sind. Bietet auf der einen Seite die Tatsache, daß der Elektrizitätszähler als Massenartikel im Falle einer besonders günstigen Konstruktion großen Gewinn bringen kann, die genügende Erklärung dafür, weshalb sich seit dem Auftauchen desselben unzählige Personen, berufene und unberufene mit der Verbesserung dieses Apparates befaßt haben, wie namentlich ein Blick in die überreichliche Patentliteratur über diesen Gegenstand lehrt, so folgt aus den vorstehenden Darlegungen über die Schwierigkeit des gesamten Problems, weshalb ein so hoher Bruchteil der verschiedensten Vorschläge ohne praktische Nutzanwendung geblieben ist. Es genügt nicht nur eine vollkommen richtige Theorie eines neuen Zählers aufzustellen, d. h. einen Apparat zu entwerfen, der grundsätzlich den verschiedensten technischen Anforderungen entspricht, der Apparat muß außerdem dauernd zuverlässig arbeiten und in der Herstellung einfach und billig sein. Es ist daher nur zu natürlich, daß irgend eine neue Konstruktion auf dem Gebiete nicht von vornherein gleich den günstigsten Kompromiß zwischen diesen

vielen Forderungen darstellt, sondern daß erst verschiedene Modelle entworfen und praktisch erprobt werden müssen, ehe sich im einen und anderen Falle ein nicht nur den bisherigen Systemen konkurrenzfähiges, sondern noch überlegenes Produkt ergibt. Der Bau von Elektrizitätszählern setzt daher theoretische, technische wie kaufmännische Kenntnisse und Fähigkeiten voraus, wie sie meistens nur bei größeren Unternehmungen, in dem Zusammenwirken verschiedener mit den einzelnen Seiten dieses Gegenstandes genügend vertrauten Personen vorhanden sind. Daß schließlich eine solche Entstehung, Vorbereitung und praktische Einführung einer neuen Konstruktion sehr erhebliche Geldmittel erfordert, erhellt schon aus dem Gesagten und gibt eine weitere Erklärung für das Scheitern so mancher Idee, die sicher einen guten Kern in sich barg.

Treffen diese Überlegungen schließlich auf jeden anderen einigermaßen komplizierten und dennoch in Massenfabrikation herzustellenden elektrischen oder mechanischen Apparat gleichfalls zu, so stellt doch der Elektrizitätszähler in dieser Hinsicht ein besonders schwieriges Problem dar, wie aus der Tatsache hervorgeht, daß sogar die vorerwähnten größeren elektrischen Institute mit den ihnen zur Verfügung stehenden reichhaltigen Kräften und Mitteln, d. h. also unter den besten Vorbedingungen trotzdem weit davon entfernt gewesen sind, auf diesem schwierigen Gebiete auf ersten Anhieb einen ganzen Erfolg zu erringen. Obschon diese Firmen ihre verschiedenen Apparate erst nach längerer Erprobung in eigenen Versuchsbetrieben in Praxis einführten, war es nicht zu vermeiden, daß größere Fehlschläge eintraten, daß manche Konstruktion ungeachtet der ausgiebigsten Vorversuche trotzdem endgültig den praktischen Anforderungen nicht zu entsprechen vermochte, sodaß sie, zuweilen unter starken materiellen Verlusten der produzierenden Firma, wieder aus dem Verkehr zurückgezogen werden mußte, daß schließlich das betreffende Zählersystem ungeachtet großer grundsätzlicher Vorzüge wegen praktischer Nachteile, die in dem Maße vorher nicht vorherzusehen waren, zugunsten eines anderen Systemes aufgegeben werden mußte, welches, anscheinend unvollkommener arbeitend, dennoch in der Feuerprobe der Praxis einen noch vollkommeneren Kompromiß der verschiedenen im Vorstehenden näher erörterten Bedingungen ergab als das erstere.

Es folgt aus alledem, daß bei der Beurteilung irgend eines Elektrizitätszählersystemes, so sehr bei dem Entwurf desselben auch wissenschaftliche, technische Kenntnisse etc. vonnöten sind, nur die Praxis das entscheidende Wort sprechen kann. Es folgt weiterhin, daß den verschiedenen praktischen Bedingungen und Zwecken entsprechend, was Preis, Verwendungsart und andere Betriebsbedingungen anlangt, der „Idealzähler" weder heute schon gefunden ist noch schwerlich wird in Zukunft gefunden werden. Den Wert oder Unwert eines Systemes macht schließlich nicht die Konstruktion selbst aus, sondern die Art und Weise, mit der sie der Gesamtheit der Bedingungen in dem einzelnen Falle, was Preis, Genauigkeit, Eigenverbrauch usw. anlangt, zu genügen vermag.

In dieser Hinsicht ist es von besonderem Nutzen und Interesse, einen Blick auf die historische Entwickelung dieser Apparate zu werfen, wozu jetzt übergegangen werden soll. Ebenso wie bei der späteren Beschreibung der heute in größerer praktischer Anwendung stehenden Systeme sind auch bei dem folgenden historischen Überblick nur die markanten Systeme, die

jeweiligen Vertreter einer besonders charakteristischen Entwickelungsform angeführt, so verlockend es auch mitunter wäre, besonders originelle und von der normalen Entwickelung abweichende Vorschläge eingehender zu erläutern. Es würde den für diesen Abschnitt billigerweise zugemessenen Raum bei weitem übersteigen, wollte man die verschiedenen Konstruktionen oft sehr ingeniöser Natur ihrem geistigen Gehalt entsprechend ausführlich beschreiben.

I.

Historische Entwickelung.

---

2. **Elektrolytische Zähler.**

Das Bedürfnis nach einem Elektrizitätszähler mußte zu einem brennenden werden, sobald mit der fortschreitenden Anwendung des elektrischen Starkstromes die Verteilung desselben von einer Zentralstelle aus an verschiedene Abnehmer eine für die elektrische Technik ernstlich zu lösende Aufgabe wurde. So war es denn ganz natürlich, daß Edison, der die elektrische Zentralstation, sowohl was die Idee als solche, als auch ihre praktische Durchbildung und Ausführung anlangt, nicht als sein kleinstes praktisches Verdienst in Anspruch nehmen kann, auch in der Konstruktion eines praktisch brauchbaren Zählers den Reigen eröffnete. Freilich bedeutet hier „praktisch brauchbar" nur vielleicht soviel als „überhaupt einer praktischen Ausführung und Anwendung fähig". Mit dem ihm eignen praktischen Instinkt wandte er bei der Lösung der Aufgabe, Elektrizität gleich einer anderen Handelsware zu messen, von vornherein dasjenige Meßprinzip, das elektrolytische. an, welches sich auch in der Folge mindestens als das konstruktiv einfachste und — mit der Einschränkung auf Amperestundenzähler — als das theoretisch genaueste herausgestellt hat, wenn man auch in Praxis gerade in dem Punkte der Meßgenauigkeit weite Konzessionen machen mußte. Edison, der verschiedene zur Lösung der Aufgabe auf diesem Wege mögliche Mittel vorschlug und probierte, verwendete hauptsächlich Zinkplatten in annähernd neutraler Zinksulphatlösung, durch welche er den zu messenden Strom, bzw. einen Teil desselben, sandte. Die abgeschiedene Menge Zinkes, durch Wägung der Platten feststellbar, ergab ein Maß der durchgeflossenen Strommenge. Diese Wägung geschah durch Beamte der elektrischen Lieferungsgesellschaft in regelmäßigen Zeiträumen im Laboratorium derselben. Die sich bald ergebenden Übelstände dieses umständlichen Verfahrens veranlaßten Edison. der rastlos an der Verbesserung seines Zentralensystemes arbeitete, die Wägung, Abholung und Neueinsetzung der Platten durch ein automatisches Verfahren zu ersetzen. Zwei Zinkplatten, gleich schwer, werden zu beiden Seiten eines Wagebalkens angeordnet. Sobald die eine Platte durch den Zinkniederschlag genügend schwerer, die andere durch Auflösung entsprechend leichter geworden ist, schlägt der Wagebalken nach einer Richtung über, bewirkt hierdurch aber eine Umschaltung des zu messenden Stromes, so daß sich nunmehr das Spiel in umgekehrter Richtung wiederholt, wodurch nach einer

bestimmten Zeit sich die Gewichtsverhältnisse beider Platten umgekehrt haben, der Wagebalken also nun nach der anderen Richtung umschlägt usw. Die Bewegungen des Wagebalkens werden durch ein Steigrad auf ein Uhrwerk übertragen: der automatisch registrierende Zähler ist da! Indessen auch dieser Zähler konnte in Praxis keinen festen Fuß fassen. EDISON half noch verschiedenen sich bei längerem praktischen Gebrauch ergebenden Übelständen ab, namentlich durch übermäßige Temperaturschwankungen hervorgerufenen Meßungenauigkeiten, und brachte so diese Kategorie von Zählern zu einer bemerkenswerten Stufe von Vollkommenheit. Ihr Hauptnachteil blieb die umständliche praktische Bedienung durch Wägung der Zinkplatten. Sie mußten daher dem von diesen Fehler völlig freien Motorelektrizitätszähler das Feld räumen. EDISON selbst versuchte noch die Behebung dieser Schwierigkeit auf dem verwandten Gebiete der Wasserzersetzung und konstruierte ein automatisch registrierendes Knallgasvoltameter, konnte sich aber schließlich den grundsätzlichen und praktischen Mängeln dieser auf elektrolytischem Prinzip beruhenden Apparate, in Sonderheit, daß sie immer nur Amperestunden-Coulombmesser sein können, nicht verschließen und versuchte daher auch auf anderem Wege sein Heil.

Indessen blieb er in seinem Bemühen, das elektrolytische Prinzip zur Konstruktion eines einfachen und zuverlässigen Zählers durchzubilden, nicht ohne Nachfolge. Aus bestimmten Gründen zeigte sich besonders in den englischen Zentralen großer Bedarf nach einem sowohl billigen, wie namentlich sehr schwache, aber lang andauernde Belastungen genau registrierenden Zähler. Englische Konstrukteure brachten daher den Elektrolytzähler wieder zu Ehren und praktischer Anwendung, wie im Folgenden gelegentlich der Apparate von LONG-SCHATTNER, BASTIAN und WRIGHT gezeigt wird.

EDISON selbst wurde in seinem Bestreben, eine von den Nachteilen des elektrolytischen Prinzipes freie Konstruktion zu finden, wiederum von seinem praktischen Instinkt zu dem nächst den elektrolytischen Zählern einfachsten System des Motorelektrizitätszählers geleitet. Allerdings, noch war von einer Theorie dieser Apparate keine Rede, und der sich zunächst darbietenden Überlegung, daß ein solcher als Messer der durchgeflossenen Energie dienender kleiner Motor eben langsam läuft, wenn wenig Strom verbraucht wird, umgekehrt schneller, wenn die Stromstärke anwächst, entsprang dann die ebenso einfache, wenn auch theoretisch falsche Konstruktion, daß man die Bewegung dieses kleinen Motors in einfachster Weise durch sich in Luft oder Flüssigkeit drehende Flügel abdämpfte. Erst spätere Untersuchungen stellten diesen Fehler in Evidenz und gaben zu einer derartigen Vervollkommnung und Entwickelung dieser Zählertype Veranlassung, daß der Motorelektrizitätszähler heute unbestritten als der praktisch wichtigste Elektrizitätsmesser zu betrachten ist. Bevor jedoch auf diese weitere Entwickelung eingegangen werden soll, müssen zwei weitere wichtige Meßprinzipien in Betrachtung gezogen werden, die fast gleichzeitig mit den ersten Versuchen zur Konstruktion eines Motorelektrizitätszählers auftauchten und auch praktisch ausgeführt wurden.

8. Uhrenzähler.

Es handelt sich hierbei in erster Linie um die Idee, ein wie gewöhnlich durch Feder oder Schwerkraft angetriebenes Uhrwerk durch den elektrischen Strom so zu beeinflussen, daß in dieser Beeinflussung ein genauer Rückschluß auf die Menge der in einer bestimmten Zeit verbrauchten und den betreffenden Apparat durchflossenen Energie gegeben ist. Es ist kenn-

zeichnend für die auf diesem Gebiet auch in der Folgezeit hauptsächlich rivalisierenden Länder, Amerika und Deutschland, daß, nachdem die Neue Welt mit frischem Mut, sich denselben nicht von vornherein durch allzu penible theoretische Spekulationen verkümmern lassend, mit den ersten praktischen, wenn auch mit vielen grundsätzlichen Fehlern behafteten Konstruktionen vorangegangen, die deutsche Technik mehr schulmäßig und wissenschaftlich vorgehend, nun die genaue Theorie gibt und danach die ersten genau arbeitenden Apparate angibt und baut. Nach verschiedenen Fehlkonstruktionen von Maxim, Siemens u. A. kommen der Aronsche Pendelzähler, der Siemens-Frölichsche Säbelzähler als Vertreter eines grundsätzlich richtig entworfenen Zählers auf den Markt.

4. Der Aronzähler.

Es ist hier insonderheit und eingehend der Verdienste von Aron um den elektrischen Zählerbau zu gedenken. Wenn auch fast gleichzeitig von Ayrton & Perry in England ein Pendelzähler nach ähnlichem Prinzip wie der Aronsche angegeben wurde, so ist diese englische Konstruktion doch nie über das Stadium des Versuches hinaus zu praktischer Anwendung gekommen. Es gebührt daher Aron das unbestrittene Verdienst, den ersten praktisch brauchbaren, genau anzeigenden Pendelelektrizitätszähler konstruiert zu haben und zwar auf Grund der von ihm zuerst entwickelten richtigen Theorie. Den zuerst einfacheren Anforderungen der Praxis entsprechend ist es zunächst ein Amperestundenzähler. Zwei miteinander verkuppelte Uhrwerke, um von den allerersten nur mit einem Gangwerk versehenen Ausführungen abzusehen, gehen für gewöhnlich annähernd gleich. Anstelle der Linse hat aber das eine Pendel einen permanenten stabförmigen Magneten, der über einer von dem zu messenden Strom durchflossenen Spule schwingt. Sobald Strom verbraucht wird, tritt eine Einwirkung dieser Stromspule auf dies Magnetpendel ein, und je nach Stromrichtung tritt eine Erhöhung oder Erniedrigung der Schwingungszahl pro Minute ein, in den älteren Zählern stets eine Beschleunigung. Diese Differenz der Schwingungszahlen, anfänglich an beiden Zifferblättern, dann im verbesserten Differentialzähler mittels eines Planetenradgetriebes direkt in elektrischen Einheiten an einem Zifferblatt ablesbar, gibt, wie durch Aron bewiesen wurde, mit praktisch genügender Genauigkeit ein Maß der durch den Apparat geflossenen Elektrizitätsmenge. Genügte im Anfange die Kenntnis der Coulomb, so verlangte eine fortschreitende Technik bald genau und direkt die Wattstunden zu wissen. Dies ist leicht möglich durch Ersatz des Magnetstabes an dem einen Pendel durch eine dünndrähtige vom Spannungsstrom durchflossene Spule: der Wattstundenzähler ist geschaffen.

Nun gilt es den Apparat mechanisch zu verbessern und — zu vereinfachen. Ist schon ein Uhrwerk ein Nachteil in den meisten Fällen, wo es irgendwie zu vermeiden ist, wie vielmehr nicht zwei; dies ganz besonders wenn dieselben — ein Problem, das schon Karl V. beinahe zur Verzweiflung brachte — genau übereingehen sollen. Aron gibt also beiden Uhrwerken einen gemeinsamen Antrieb, den er wieder durch ein Planetenradgetriebe zwei Werke mit zwei Pendeln betreiben läßt. Nur die Differenz ist an dem einen Zifferblatt abzulesen.

Jetzt verlangt aber die auch auf anderen Gebieten stetig zunehmende Meßgenauigkeit, daß bei dem ersten Entwurf des Apparates gemachte Annahmen, auf Vernachlässigung gewisser Größen hinauslaufend, korrigiert werden. Die hierdurch möglichen Fehler werden durch eine sinnreiche Um-

schaltung beseitigt, die in Verbindung mit einer Erhöhung der Schwingungszahl sowohl die Genauigkeit erhöht, wie obigen Fehler ausschließt.

Diese Verbesserungen haben den Zähler auf eine hohe Stufe der Vollkommenheit gebracht, auch der kommerzielle Erfolg ist nicht ausgeblieben. Die wachsende praktische Verbreitung des Zählers läßt aber auch mit der Zeit allerhand Schattenseiten erkennen, die auch diesem vorzüglichen Apparat anhaften, und die Konkurrenz bemüht sich dieselben nach Kräften auszunutzen. Es ist vornehmlich der mechanische Teil, das Uhrwerk, das zu allerhand praktischen Unbequemlichkeiten Veranlassung gibt. Geht das Werk auch 4 bis 6 Wochen, so wäre zweifellos ein rein selbsttätiger Betrieb des Zählers, nur durch elektrische Energie des Netzes selbst angetrieben, weit vorzuziehen und macht den Betrieb von sorgsamer Bedienung völlig unabhängig. Aron konstruiert infolgedessen einen mustergültig zu nennenden automatischen elektrischen Aufzug seiner Uhr und bringt hierdurch den Zähler auf eine Stufe von theoretischer und praktischer Vollkommenheit, wie dieselbe noch heute von keinem anderen Apparat erreicht sein dürfte, geschweige denn übertroffen ist. Denn, um nur einen Punkt hervorzuheben, der Pendelzähler nach Aron ist der einzige, bei dem der fehlerhafte Einfluß der Reibung völlig, weil prinzipiell beseitigt ist. Der Zähler ist ferner mit gleicher Genauigkeit für Gleich- wie Wechselstrom und Drehstrom zu benutzen und läßt die verschiedensten Schaltungen und praktischen Sonderanwendungen zu, wie im folgenden noch gezeigt wird.

Allein auch dieser sinnreiche und den weitgehendsten Ansprüchen technischer wie wissenschaftlicher Art entsprechende Apparat hat sein „Aber“. Wie schon die vorstehend skizzierte Entwickelung erwarten ließ, durch all diese Verbesserungen hat der Zähler wohl an Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Bequemlichkeit im Betriebe gewonnen, nicht aber an Einfachheit und Preiswürdigkeit. Der Zähler, ursprünglich verhältnismäßig einfach, ist ein mechanisches Kunstwerk geworden, das dementsprechend auch kompliziert und teuer ist. Hierdurch schied, wie die Praxis denn auch lehrte, der vorzügliche Aron-Zähler für die meisten kleineren Zentralen, die hinsichtlich Anschaffungspreis und Miete dieser Apparate nur über ein sehr beschränktes Budget verfügen, als zu teuer aus. Diesen kommerziellen Nachteil seiner Apparate hat schließlich Aron selbst dadurch offen anerkannt, daß er in neuester Zeit, wenigstens für Wechselstrom, neben seinen Wechselstrom-Pendelzählern auch die Fabrikation der zwar die hohe Stufe der Genauigkeit dieser Apparate nicht erreichenden, dafür aber auch einfacheren und billigeren Motorelektrizitätszähler nach dem Induktionsprinzip aufgenommen hat.

Der Aronsche Pendelelektrizitätszähler besteht zwar streng genommen ebenso wie die nunmehr zu betrachtende Kategorie der mit registrierender Uhr arbeitenden Zähler aus dem mechanischen, registrierenden und dem messenden, elektrischen Teile, doch greifen bei diesem übrigens nur von Aron bzw. den nach seinen Patenten arbeitenden Gesellschaften hergestellten Pendelelektrizitätszähler beide Teile, der mechanische und elektrische, im Prinzip und Arbeitsweise derart eng ineinander, daß man dem Pendelzähler billigerweise als eine Sonderklasse bezeichnen muß. Denn während bei dem Aron-Zähler eine direkte elektrische Beeinflussung des Ganges der Uhr stattfindet, dient in der anderen Kategorie der reinen Uhrzähler das mechanische Gangwerk nur dazu, die Stellung des beweglichen Systemes eines elektrischen Meßinstrumentes andauernd und in bestimmten Zeiträumen zu registrieren.

Die Wahl der elektrischen Meßinstrumente und die nach verschiedenen Methoden ausführbare mechanische Registrierung ergeben dann die einzelnen Konstruktionen. Diese Abteilung der aus einem elektrischen Meßinstrument und dem mechanischen die Stellung des ersteren registrierenden Uhrwerk bestehenden Elektrizitätszähler umfaßt die Mehrzahl der vielen Konstruktionen mechanischer Zähler, die vorgeschlagen, auch wohl in einzelnen Modellen praktisch hergestellt sind, sich aber wegen ihrer Komplikation, dem unsicheren Betrieb und Kostspieligkeit nicht haben praktisch einbürgern können.

5. Zähler mit absatzweiser Registrierung.

Diesen Weg schlug auch die Firma Siemens & Halske bei ihrem Säbelelektrizitätszähler ein, dessen Entwickelung fast mit derjenigen des Aronschen zusammenfällt. Auch hier wird der normale Gang eines von einer mechanischen Fremdkraft, d. h. nicht durch den zu messenden elektrischen Strom angetriebenen Uhrwerkes, von dem letzteren beeinflußt, hier aber mechanisch. Ein je nach Art des Zählers als direkt zeigendes Ampere- oder Wattmeter für Zwei- oder Dreileiter-Gleich- und Wechselstrom ausgebildetes elektrisches Meßinstrument hat einen an dem freien Ende zu einer Schneide ausgebildeten Zeiger. Das Uhrwerk bewegt einen mit feinen Zähnen versehenen Aluminiumbügel, nach seiner Form auch Säbel genannt, in gleichmäßigen Zeiträumen, $1^1/_4$ Minute etwa, nach oben. Steht der Zeiger auf 0, so wird der ganze Hub ausgeführt. Steht der Zeiger bei halbem Maximalstrom in der Mitte der Skala, so kann die Schneide nur die Hälfte des Hubes ausführen, er stößt an den Zeiger und bleibt während der zweiten Hälfte in dieser Stellung. Dieser nichtausgeführte Hub wird registriert. Der Krümmung der Skala entsprechend wird der Aluminiumsäbel empirisch nach einer bestimmten Kurve gebogen, um zwischen der jeweiligen Stellung des Zeigers und dem Hub des Säbels Proportionalität zu erzielen. Wir haben hier gleichzeitig ein Beispiel der absatzweisen Registrierung, die an und für sich einen Nachteil darstellt, eine grundsätzliche Unvollkommenheit, von der der Aronsche Pendelzähler und die Motorelektrizitätszähler frei sind.

Die zuletzt betrachtete Zählertype, wie der Aron-Zähler für alle Stromarten ausführbar, mußte trotz ziemlich großer Verbreitung, namentlich in den von der Firma Siemens gebauten und betriebenen Zentralen, aufgegeben werden. Die lange Registrierperiode machte den Zähler von vornherein für schnell variierende Ströme wie bei elektrischen Bahnen, Aufzügen usw. unbrauchbar. Denn, war wohl die Reibung theoretisch bei der Messung ohne Einfluß, praktisch hatte namentlich die empfindliche Lagerung des relativ schweren Schwachstromsystemes auf Schneiden große Übelstände im Gefolge, die sich in Schwierigkeiten beim Transport, der Montage und dem Ingangsetzen des Zählers an Ort und Stelle, sowie im Betrieb durch Nullpunktsveränderungen kundgaben. Der nur kleine Ausschlag des elektrischen Instrumentes von 30 Grad machte dasselbe zu genauen Messungen namentlich in den unteren Meßbereichen sehr ungeeignet. Schließlich stellten sich auch hier die unausbleiblichen mit jedem mechanischen Uhrwerk verknüpften Übelstände heraus, und die Folge der Bemühungen der Firma Siemens & Halske, obigen Übelständen abzuhelfen, war ein neuer von Raps erfundener und von der Firma Ende der 90 er Jahre unter dem Namen „Präzisions-Elektrizitätszähler“, vorerst für Gleichstrom, auf den Markt gebrachter Zähler. Da derselbe in überaus sorgfältiger Weise, was sein Prinzip und die mechanische Ausführung anlangt, entworfen und hergestellt wurde, so möge ein näheres Eingehen auf denselben an dieser Stelle gerechtfertigt sein, einmal da er

heute schon der Geschichte des Elektrizitätszählers angehört, dann aber, weil er ein besonders lehrreiches Beispiel für die diesem Gegenstande anhaftenden, mannigfachen Schwierigkeiten bildet.

6. Präzisionszähler von Raps.

Das Grundprinzip der absatzweisen Registrierung — von der Beeinflussung des Ganges einer Uhr kann hier nicht gut mehr gesprochen werden — wurde beibehalten, doch in wesentlich veränderter Form. Statt nur alle $1^1/_4$ Minute erfolgte hier ungefähr alle 3 Sekunden eine Registrierung, so daß der Zähler auch für schnell wechselnde Belastung verwendbar wurde. Der weiter gegen das besondere mechanische von Zeit zu Zeit aufzuziehende Uhrwerk erhobene Einwand, wurde ähnlich wie dies ARON durch seinen elektrischen Aufzug tat, durch eine intermittierende elektrische Betätigung des Antriebes behoben, in der Weise, daß ein von der Spannung erregter und nur wenig Energie benötigender Elektromagnet eine schwere auf Kugeln gelagerte Unruhe in schwingende Bewegung setzte und darin erhielt, siehe Fig. 1. Störende Funkenbildung an den Kontakten — zur Sicherheit als Doppelkontakt fc — $f'c'$ ausgebildet — wird durch die besondere Kurzschlußschaltung der Elektromagnetwickelung M vermieden. Für gewöhnlich ist dieselbe durch die Kontakte fc kurzgeschlossen, so daß der Vorschaltwiderstand W den gesamten Nebenschlußwiderstand ausmacht. Die Betätigung des Elektromagneten erfolgt daher durch Öffnung des Kontaktes. In sinnreicher Weise war Fürsorge getroffen, daß innerhalb weiter Grenzen der in einer elektrischen Zentrale vorkommenden Spannungsschwankungen letztere dem gleichmäßigen Gange der Unruhe keinen Abbruch tun konnten.

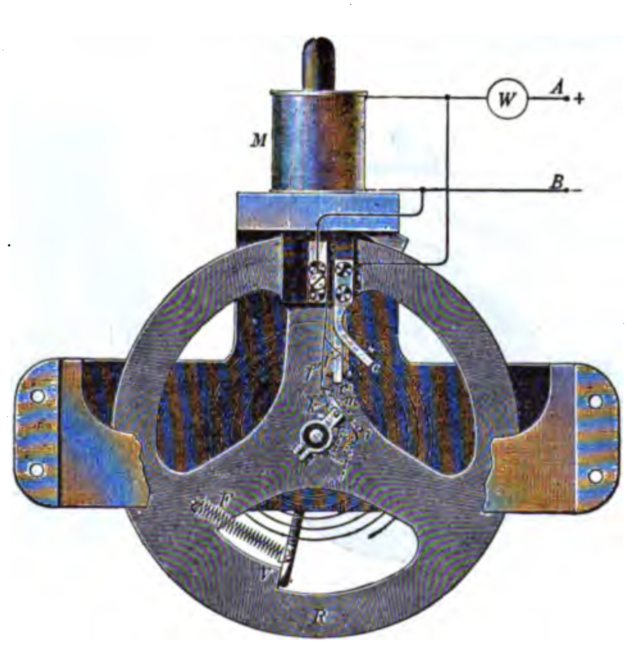


Fig. 1.

Nun galt es die Genauigkeit des elektrischen Instrumentes wie des ganzen Zählers zu heben. Statt des nur 30° Ausschlag ergebenden älteren elektromagnetischen oder elektrodynamischen Systemes mit ungleichmäßiger Skala kamen die neueren Drehspuleninstrumente (DEPREZ-D'ARSONVAL) zur Anwendung, mit gleichmäßiger 90° begreifender Skala. Die Registrierung geschah in folgender Weise. Ein Mitnehmer wurde von der Unruhe bei jeder Schwingung dicht über ein ca. 4 cm im Durchmesser habendes dünnes Stahlrad Z bewegt, s. Fig. 2. Wie aus Fig. 3 ersichtlich ist, welche einen Wattstundenzähler mit abgehobener Schutzkappe darstellt, war hierbei, von der Rückwand des Zählers aus gerechnet, die räumliche Reihenfolge die folgende: Oszillationsmotor, Meßinstrument, Zählscheibe Z, Zählwerk. Die

Achsen der Unruhe und des elektrischen Meßinstrumentes fielen in eine Linie. Das Zählrad Z war durch Spezialmaschinen mit 1200 Zähnen versehen. Der Mitnehmer, von der Unruhe unterhalb des elektrischen Meßinstrumentes herumgreifend, trug ferner an seinem der Unruhe abgewandten Ende eine mit einem ganz geringen Abstand über dies feingezahnte Rad hinschleifende Blattfeder. Sobald letztere bei irgend einem Ausschlag des Instrumentzeigers an einen Vorsprung des letzteren stieß, wurde sie durch den leichten Druck auf das feingezahnte Rad niedergedrückt, so daß letzteres nunmehr mit der Unruhe von dieser Zeigerstellung an mechanisch gekuppelt, von derselben um diesen Winkel gedreht wurde und hierdurch den Zeigeranschlag registrierte. Von dem feingezahnten Rande wurden die Bewegungen dann wie üblich auf ein Zählwerk übertragen.

Dieser Zähler besaß nun wirklich schätzenswerte Eigenschaften: eine hohe Empfindlichkeit, die durch das Zählrad mit 1200 Zähnen bedingt wurde,

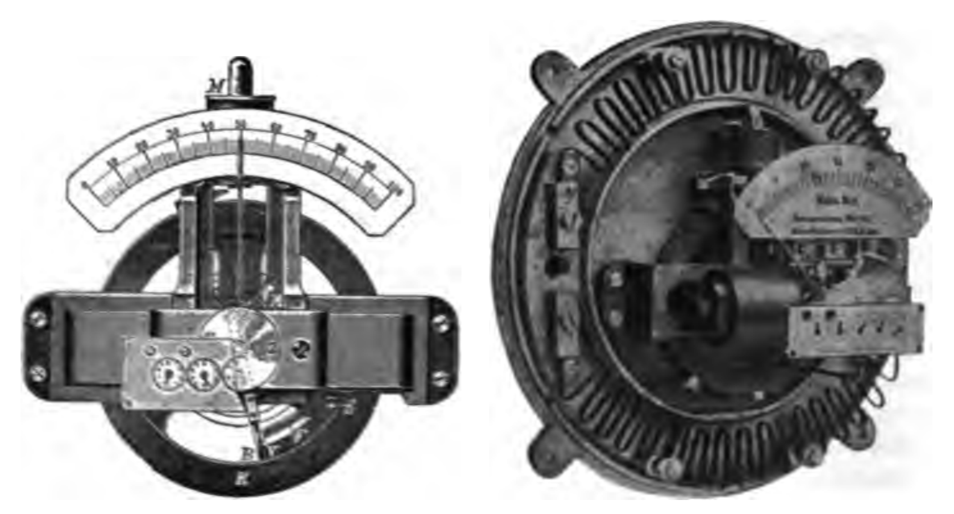


Fig. 2. Fig. 3.

so daß der Apparat von ca. $^1/_2$ % der Maximalbelastung an zu zählen anfängt; große Genauigkeit, entsprechend derjenigen der Drehspuleninstrumente; geringen Stromverbrauch, der z. B. bei einem Coulombzähler von 12·5 Ampere maximal einschließlich des Stromes für den periodischen Motor nur ca. 1·5 Watt beträgt; der Zähler kann plombiert verschickt werden und bedarf keiner genau lotrechten Aufhängung; er soll auf dem Transport wie im Betriebe selbst starken Stößen gegenüber sehr widerstandsfähig sein; er bedarf keinerlei Wartung; er gibt schließlich noch gratis ein gutes Meßinstrument der verbrauchten Amperes bzw. Watt ab.

Trotzdem wurde der Zähler, aller aufgewandten Mühe und vorzüglichen Eigenschaften ungeachtet, von der Firma nach längerem praktischen Gebrauch wieder eingezogen. Weshalb?

Der Zähler war zu kompliziert, nicht einfach genug, und ergaben sich hieraus die doppelten unangenehmen Folgeerscheinungen der mangelnden Betriebssicherheit und des zu hohen Preises. Der Zähler enthielt: Zwei bewegliche Systeme, das sich in feinen Spitzen drehende Meßinstrument, welches daher allen Nachteilen dieser Instrumente, wie Spitzenreibung, Nullpunkt-

verstellung, Änderung der Torsionskraft und der magnetischen Kraft des Feldes ausgesetzt war, dann die schwere Unruhe, die des leichteren Ganges wegen auf Kugellager laufen mußte, wodurch die weitere Unsicherheit dieses auch heute noch lange nicht die Betriebssicherheit eines gewöhnlichen Lagers aufweisenden Maschinenteiles, hinzukam; schließlich mehrere Kontakte, dünne Federn etc. Alle diese Teile an sich und in ihrem Zusammenwirken waren auf die Dauer den verschiedenen Einwirkungen des rauhen praktischen Betriebes mechanischer wie elektrischer Natur nicht gewachsen und gaben zu kostspieligen Reparaturen Veranlassung, nicht zu reden von dem übrigen Ärger, den solch Zähleraustausch oder Betriebsunterbrechung für Zentrale wie Konsumenten verursacht.

Schließlich, und dies war wohl der Hauptgrund, stellte sich der Zähler so teuer, selbst in Massenfabrikation, daß er mit den billigeren Motorelektrizitätszählern nicht zu konkurrieren vermochte. Auch die Firma Siemens & Halske ging dem allgemeinen Beispiel folgend zu letzterer Gattung von Elektrizitätszählern über.

Wir haben also hier die gleiche Erscheinung, daß auch in diesem Falle die Entwickelung wie schon bei Edison und Aron auf den Motorzähler hinführt, der ungeachtet seiner verschiedenen und großen Nachteile schließlich doch infolge seiner Einfachheit und Billigkeit das Feld behauptet, und dessen Entwickelung wir uns jetzt zuwenden wollen.

7. Thomsons Motorelektrizitätszähler.

Nach den ersten ungenauen und unvollkommenen Modellen dieser Apparate von Edison u. a. konstruierte Prof. E. Thomson Mitte der achtziger Jahre den nach ihm benannten Motorelektrizitätszähler, gleicherweise für Gleich- wie für Wechselstrom anwendbar. Wenn auch die Theorie dieser Zählergattung sehr wahrscheinlich zuerst von dem berühmten französischen Elektriker Deprez angegeben wurde, der namentlich die Bedeutung und Notwendigkeit der magnetischen Wirbelstromdämpfung richtig erkannte, so erhielt doch der Motorzähler seine erste gründliche und sachgemäße praktische Durchbildung durch Thomson in Amerika. Um genaue Proportionalität zwischen den zu messenden Strömen, Haupt- und Spannungsstrom zu erzielen, wurde auf die Anwendung des wohl die Empfindlichkeit vermehrenden, aber die Genauigkeit der Messung störenden Eisens verzichtet und das reine elektrodynamische Prinzip benutzt, und hierdurch die absolute Proportionalität von Leerlauf bis Vollbelastung erreicht. Allerdings mußten hierdurch gleichzeitig eine Reihe anderer schwerer mechanischer wie elektrischer Übelstände mit in Kauf genommen werden, namentlich die große mechanische Reibung: Um ohne Eisen merkliche mechanische Kraft zu erzeugen, mußten im Stark- wie Schwachstromsystem verhältnismäßig viele Amperewindungen zur Anwendung kommen, was in beiden Systemen starken Eigenverbrauch ergibt, im beweglichen Spannungssystem außerdem noch ein schweres Gewicht, und hieraus folgend, starke mechanische Reibung. Bei Anwendung auf Wechselstrom ergab sich bei starker Phasenverschiebung schließlich noch eine nicht zu vernachlässigende Wirkung der Selbstinduktion.

Thomson führte sodann praktisch die magnetische Dämpfung ein, um, wie aus der Theorie der Zähler folgt, die Angaben derselben, d. h. die Umlaufgeschwindigkeit in einem gegebenen Momente oder die Umdrehungszahlen innerhalb einer bestimmten Zeit der verbrauchten Leistung bzw. Arbeit proportional zu machen. Diese Dämpfung, aus einer im Felde eines oder mehrerer permanenter Magnete sich drehenden Metallscheibe bestehend,

wurde meist aus Kupfer hergestellt, brachte jedoch selbst in Ausführung aus Aluminium eine derartige Erhöhung des Gewichtes des beweglichen Systemes mit, daß man es dadurch bei diesen Apparaten schon direkt mit kleinen Maschinen zu tun bekam.

8. Schädlichkeit der Reibung. Die Hauptschwierigkeit dieser Motorelektrizitätszähler bildete jedoch nicht die Lagerreibung, sondern stellte sich an demselben „Maschinenteil" heraus, wie an den Gleichstrommaschinen selbst, am Kommuntator oder Stromwender. Ist es bei der Kraftzwecken dienenden elektrischen Maschine die Funkenbildung, welche das Hauptaugenmerk des Konstrukteurs beim Entwurf und der Bedienung im praktischen Betrieb erfordert, kommt hierbei die mechanische Reibung nur als ein den Wirkungsgrad unerheblich beeinflussender Faktor in Frage, so ist es bei dem Zähler den geänderten Funktionen entsprechend fast umgekehrt, hier bildet die mechanische Reibung das ernsteste Bedenken, und zwar nicht so sehr das Vorhandensein dieser Größe an und für sich, als vielmehr ihre Veränderlichkeit. Hierbei spielt alsdann auch die Funkenbildung keine unerhebliche Rolle, so klein sie auch namentlich bei Gleichstromzählern wegen der geringen zu kommuntierenden Strommengen ist. Sie verändert aber trotzdem mit der Zeit die Oberfläche der Stromwenderlamellen, macht sie rauh und ändert hierdurch die mechanische Reibung.

Die mechanische Reibung am Stromwender in ihrer zeitlichen Änderung stellt daher den ernstesten Übelstand dieses sonst grundsätzlich so einfachen Systemes der Gleichstrom-Motorzähler dar und noch heute ist das unablässige Bemühen der Konstrukteure und Erfinder darauf gerichtet, diesen Übelstand auf ein praktisches Minimum zu bringen.

Das nächste Streben war natürlich darauf gerichtet die Reibung selbst nach Kräften zu verringern. Während die Lagerreibung in aus der Uhren- und Meßinstrumententechnik bekannter Weise durch Anwendung von geeigneten Lagerkonstruktionen — fein polierte Stahlzapfen bestimmter Krümmung auf Edelsteinen laufend oder in ebensolchen Halslagern — erheblich vermindert wurde, konnte man dies bei dem Kollektor nicht in gleich einfacher Weise ausführen. Der Durchmesser wurde in manchen Konstruktionen durch Verringerung der Lamellenzahl auf 3, ja auf 2 Lamellen nach Möglichkeit reduziert, was wieder bestimmte Änderungen der Ankerschaltung nötig machte. Der Luxsche 3-Spulenzähler ist hierfür ein typisches Beispiel. Ein ungleiches pulsierendes Drehmoment, je nach der augenblicklichen Stellung des Ankers war die Folge.

9. Oszillationszähler. Auf diese Weise konnte man nun wohl die Reibung vermindern, nie aber ganz beseitigen. Dies Ziel erschien aber möglich, indem man von der reinen rotierenden Bewegung zu der einfacheren oszillierenden zurückging. Die bewegliche vom Spannungsstrom durchflossene Spule, die ihren Strom durch feine biegsame Drähte oder Schnüre zugeführt erhält, wird durch die feste Starkstromspule abgelenkt, bis in ihrer äußersten Stellung der Strom in ihr mechanisch umgeschaltet wird, wodurch sie einen Antrieb in entgegengesetzter Richtung erfährt. Außer der Lagerreibung ist hier also, von der zu vernachlässigenden der dünnen Zuführungsdrähte abgesehen, keine schleifende Reibung vorhanden. Wohl aber beruht die ganze Zuverlässigkeit des Zählers auf derjenigen der Umschaltkontakte. Bekanntlich stellen derartige Kontakte, selbst in bester Ausführung mit Platinspitzen, nicht den Gipfel der Betriebssicherheit dar. Der noch heute ausgeführte A.E.G.-Oszillationszähler

kann als Muster dieser Gattung gelten, die von HUMMEL, LOTZE u. a. vorgeschlagen und ausgeführt wurde.

10. Reversierzähler.

Einen anderen Kniff — denn um etwas anderes handelt es sich nicht — sieht man in den „kollektorlosen" Zählern, wie es in den Ankündigungen der „Deutsch-Russischen El. Z. Ges." s. Z. lautete, dieser Firma angewendet. Die dem Motoranker den Strom zuführenden Bürsten nehmen an der Drehung für einen bestimmten Anschlagswinkel teil. Statt nun am Ende dieser Periode den Strom umzukehren, wodurch eine oszillierende Bewegung eingeleitet würde, werden die Bürsten — allerdings auch durch ein Kontaktwerk — mechanisch von dem Kollektor entkuppelt und, da sie zum Anker relativ beweglich angebracht sind, in ihre Anfangsstellung sprungweise überführt und dort wieder mit dem Anker elektrisch verbunden. Somit rotiert der Anker in dem gleichen Sinne, während die Bürsten ruckweise oszillieren. Wie hieraus hervorgeht, ist so allerdings die gleitende Reibung am Kollektor vermieden und letzterer Bestandteil in der bei anderen Motorelektrizitätszählern üblichen Form überhaupt nicht vorhanden. Dafür hat man aber ein doppeltes Kontaktwerk, unterteilte Achsen und andere negative Annehmlichkeiten und Vereinfachungen. Die Kommutation findet eben nur in mechanisch anderer Weise statt.

Ist die Reibung somit grundsätzlich nicht zu beseitigen, oder doch höchstens durch hinsichtlich der Betriebssicherheit noch zweifelhaftere Anordnung ersetzbar, so kann man ihre Wirkungen doch durch eine gleiche Gegenkraft aufheben.

11. Reibungskompensation und Verminderung.

Schon THOMSON brachte in die Hauptstromspulen eine vom Spannungsstrom erregte zusätzliche Spule hinein, welche bei nomaler oder ein wenig übernormaler Spannung gerade ein hinlänglich starkes Feld erzeugte, um im Verein mit demselben den Anker durchfließenden Spannungsstrom den Anker fast zum Umlauf zu bringen, d. h. es bedurfte nun nur eines geringen Stromes in den Hauptstromwindungen, um den Zähler, sagen wir bei ca. 1% seiner Maximalbelastung, zum Umlauf zu bringen. Wäre wie gesagt die Reibung in den Lagern und an dem Kollektor annähernd als konstant zu betrachten, so wäre ihr Einfluß so in einfacher Weise zu kompensieren gewesen. Nun ist das aber, wie auseinandergesetzt, leider nicht der Fall, und so stellt dieses noch heute praktisch sehr häufig angewendete Mittel des zusätzlichen Spannungsfeldes nur einen wenig vollkommenen Behelf dar. Denn wenn, was auch vorkommt, die Reibung durch irgend welche anderen Einflüsse mit der Zeit geringer wird, so kann der Fall leicht eintreten, daß die Zusatzspule auch bei offenem Strom rein durch den Spannungsstrom den Zähler zum Laufen bringt, der Zähler also in seinen schlimmsten Fehler, den Leerlauf, verfällt. Dies zu vermeiden hat man wieder andere Mittel vorgeschlagen und angewendet, um unter allen Umständen zu verhüten, daß der Zähler unter einer bestimmten Belastung, wie z. B. 1%, anläuft. Hierzu wird sehr häufig das Feld der Dämpfungsmagnete benutzt, das auf einen kleinen Eisenkörper auf der Dämpfungsscheibe anziehend wirkt. Die Verhältnisse werden dann so abgepaßt, daß das die Reibung kompensierende zusätzliche Feld der festen Spannungsspule nicht ausreicht, den Zähler zum Laufen zu bringen. Erst die beabsichtigte Minimalbelastung von ca. 1% in den Starkstromspulen ist imstande, den durch die Anziehung der Dämpfermagnete auf den kleinen Eisenkörper in einer bestimmten Stellung festgehaltenen Anker zum Umlauf zu bringen.

Bei Wechselstromzählern werden im gleichen Sinne wirkende Vorrichtungen benutzt.

Von wesentlichem Einfluß auf die Reibung ist wie überall so auch hier das Gewicht des sich drehenden Körpers. Man ging daher von dem in der ersten Entwickelungsstufe dieser Motorzähler angewendeten ganz nach Art eines Trommelankers gewickelten beweglichen Anker vielfach ab und zu einfacheren und leichteren Wickelungssystemen über, namentlich zu dem Dreispulenanker, wie wir schon bei dem Luxschen Zähler sahen, um gleichzeitig durch Verringerung des Kollektordurchmessers in derselben Richtung der Reibungsverminderung zu profitieren. Die Dreispulenwickelung bot aber noch den weiteren Vorteil, daß für einen großen Teil der Umdrehung des Zählerankers die Stromteilung in demselben vermieden wird, was eine Erhöhung der Empfindlichkeit, bzw. bei gleicher Empfindlichkeit Verringerung des Gesamtgewichtes des beweglichen Systemes bewirkt. Auch Zweispulen- und Einspulenanker wurden in Vorschlag gebracht, die ähnliche Vorteile hinsichtlich Gewichtsreduktion und Erhöhung der Empfindlichkeit zur Folge haben. Doch ergeben sich bei diesen Systemen auf der anderen Seite Schwierigkeiten bezüglich der Überwindung des toten Punktes oder der Stellen geringerer Kraftwirkung, welche man wieder durch andere Hilfsmittel ausgleichen muß, so daß schließlich kein Gewinn an Einfachheit übrig bleibt.

12. Spulenanker. Aus dem gleichen Grunde einer Gewichtsverminderung, sowie der weiteren Überlegung Folge gebend, daß der gewöhnlich verwendete Trommelanker bei irgendwelchen an ihm vorzunehmenden Reparaturen sehr unbequem ist, da man bei Verletzung einer Spule unter Umständen gezwungen sein kann, den ganzen Anker abzuwickeln, gingen einige Firmen dazu über, statt dessen den einfacheren Flachspulenanker als bewegliches System des Motorelektrizitätszählers anzuwenden, da hierbei jede einzelne Spule leicht und ohne die anderen in Mitleidenschaft zu ziehen ausgewechselt werden kann. Man hat sich dieser Konstruktion mit gutem Erfolge bei den mit einem permanenten magnetischen Feldsytem arbeitenden Amperestundenzählern bedient, wie dieselben noch heute von verschiedenen Seiten hergestellt werden. Bei Wattstundenzählern hat man jedoch in den meisten Fällen, wahrscheinlich infolge der geringen dieser Anordnung innewohnenden Empfindlichkeit, diese Wickelungsform wieder verlassen.

13. Verwendung von Eisen im Spannungssystem. Das relativ hohe Gewicht des beweglichen Systemes bei diesen auf elektrodynamischem Prinzip beruhenden Meßinstrumenten ist, wie bereits in anderen Teilen dieses Werkes begründet ist, auf die schwachen elektrodynamischen Kräfte zurückzuführen, die in Abwesenheit von Eisen viele Amperewindungen nötig machen. Das Hineinbringen von Eisen erhöht wohl die Empfindlichkeit bedeutend, ist aber allgemein und streng genommen bei elektrodynamischen Meßgeräten nicht anwendbar, da hierdurch die absolute Proportionalität in den Angaben dieser Instrumente eine Beeinträchtigung erfährt. Dieser prinzipielle Übelstand ist jedoch in dem Sonderfall des Elektrizitätszählers einer praktischen Milderung fähig, und läßt es sich durch geschickte Konstruktion bei zweckmäßiger Anordnung und Abmessung der einzelnen Größen erreichen, daß sich durch Anwendung von Eisen mehr Vorteil als Nachteil ergibt.

Die in der bekannten Magnetisierungskurve des Eisens erkennbare Nichtproportionalität zwischen magnetomotorischer Kraft und erzeugtem

magnetischen Gesamtfeld verbietet es, Eisen in den Hauptstromspulen zu verwenden. Der in der Mitte dieser Magnetisierungskurve enthaltene grade Teil macht es aber möglich, sich dieser verstärkenden Wirkung des Eisens im Spannungsfelde zu bedienen. Denn ein Elektrizitätszähler dient in erster Linie dazu, die zwischen Null und dem betreffenden Maximalwert schwankenden Stromstärken zu registrieren, was durch das proportional mit der Stromstärke sich ändernde Feld der Starkstromspulen auch ermöglicht wird.

Daneben soll der Zähler aber auch den jeweiligen praktischen Schwankungen der Betriebsspannung gebührend Rechnung tragen, da man ja bei absolut gleichbleibender Netzspannung nur Amperestundenzähler nötig hätte. Die Betriebsspannung wird nun auch aus wohlbekannten praktischen Gründen nach Möglichkeit konstant erhalten, jedoch, sind schon in dem ruhigeren Lichtbetriebe Schwankungen von mehreren Prozent nicht zu vermeiden, so kommen im vorwiegenden Kraft- und Bahnbetriebe solche von $\pm$ 15 bis 20 % um einen Mittelwert vor. Noch größere Fluktuationen der Netzspannung um ihren Mittelwert sind jedoch unter normalen Verhältnissen aus Gründen der Sicherheit ausgeschlossen, und brauchen daher die Zähler nicht darauf eingerichtet zu werden. Dies macht nun die Anwendung von Eisen im Spannungssystem möglich. Trifft man durch entsprechende Bemessung des Eisenquerschnittes, der Windungszahlen etc. die Verhältnisse so, daß das betreffende mit Eisen armierte Spannungssystem bei Erregung durch den Mittelwert der Spannung gerade die der Mitte des geraden Teiles der Magnetisierungskurve entsprechende magnetische Feldstärke annimmt, so sind Schwankungen der Betriebsspannung um $\pm$ 20 % um diesen Mittelwert ohne wesentliche Störung. Innerhalb dieser Grenzen wird das magnetische Feld stets annähernd proportionale Werte zu jenen Schwankungen annehmen. Diese Proportionalität wird um so vollkommener sein, je weicher die betreffende Eisensorte ist, d. h. je geringere Hysteresis sie aufweist.

Die noch störende Wirkung der Hysteresis wird vollends praktisch beseitigt, wenn man den Spannungsstrom in genügend kurzen Intervallen unterbricht oder umkehrt. Man arbeitet alsdann nur im aufsteigenden Ast der Magnetisierungskurven, d. h. jeder neue Wert des Spannungsfeldes wird aus dem praktisch entmagnetisierten Eisen durch Neumagnetisierung erhalten. Unter diesen Verhältnissen kommt man zu annähernd sehr proportionalen Werten zwischen magnetomotorischer Kraft und erregtem magnetischen Feld, d. h. immer nur innerhalb der dem geraden Teile der Magnetisierungskurve entsprechenden Werte.

Dies Prinzip der Nutzbarmachung der verstärkenden Wirkung von Eisen im Nebenschlußfeld von Zählern dürfte zum ersten Male von Raps in dem bereits erwähnten auf der absatzweisen Registrierung beruhenden Präzisions-Wattstundenzähler von „Siemens & Halske“, Berlin, angewandt sein. Es wurde weiter verwendet in dem von Pelloux konstruierten und danach von Siemens & Halske aufgenommen und fabrikationsmäßig hergestellten Flügel-Wattstundenzähler, schließlich in einer Konstruktion der Deutsch-Russischen Elektrizitätszähler-Gesellschaft, verschiedenen anderen Konstruktionen des Verfassers u. a.

Die Einführung von Eisen ermöglichte noch eine andere vorteilhafte Anordnung im Spannungssystem. Wie schon aus der Induktortype der Wechselstrommaschinen bekannt ist, ist es möglich, bei bestimmter Gestaltung der Polstücke nur den Eisenkörper des magnetischen Feldes rotieren zu

lassen, während Anker wie Feldwindungen festliegen. Da nun ein solcher Elektrizitätszähler, bei dem der Strom in einem System zur Erzielung der kontinuierlichen Bewegung 2 bis 4 mal während einer Umdrehung kommutiert wird, prinzipiell in seiner Wirkungsweise mit einer solchen synchronen Wechselstrommaschine übereinstimmt, so war vorauszusehen, daß diese verschiedene mechanische Vorteile darbietende Anordnung auch bei dieser Kategorie von mit Eisen arbeitenden Zählern anwendbar war.

Man kommt so zu dem durch den oben genannten Siemensschen Flügel-Wattstundenzähler charakterisierten Typ der Gleichstromzähler, bei denen lediglich die Eisenarmaturen rotieren, während Stark- wie Schwachstromspulen samt Kommutator fest angeordnet sind. Die besonderen Eigenschaften dieser Sonderklasse von Gleichstrom-Motorzählern werden später genauer erörtert.

14. Motoramperestundenzähler.

Stellt der Motor-Gleichstromzähler somit dem zwar sehr genauen aber auch teuren Aronschen Pendelelektrizitätszähler gegenüber insofern einen Fortschritt dar, daß er bei geringerem Preise eine praktisch ausreichende Genauigkeit und Betriebssicherheit gewährt, mit Ausschluß jedweder Bedienung, von der in bestimmten Zeiträumen vorzunehmenden Ablesung der Zifferblätter natürlich abgesehen, so war doch für eine Reihe kleinerer Zentralen selbst dieser Preis noch zu hoch. Da man vielfach mit dem einen Zähler überhaupt entbehrlich machenden Pauschalbetrieb auf beiden Seiten, Zentrale wie Konsumenten, nicht sich zufrieden erklären konnte, die teuren Wattstundenzähler jedoch nicht anschaffen konnte oder wollte, so war von Anfang des elektrischen Zentralenbetriebes an bis heute das Bedürfnis nach einem einfachen und zuverlässigen vor allem aber billigen Amperestundenzähler vorhanden und zeitigte demgemäß verschiedene Lösungen der Aufgabe, um so mehr, da der Amperestundenzähler, abgesehen von seiner grundsätzlichen Unvollkommenheit der Messung dem Wattstundenzähler gegenüber, diesem, wie noch gezeigt werden wird, in verschiedenen anderen Punkten überlegen ist.

Wir sahen bereits, wie hierzu namentlich von englischen Konstrukteuren das elektrolytische Prinzip benutzt wurde, selbst nachdem es von dem ersten Erfinder dieser Kategorie, Edison, schon aufgegeben war. Die bekannten Nachteile dieser Meßmethode veranlaßten jedoch die Mehrzahl der anderen Fabrikanten, die Lösung auf rein mechanischem Wege zu suchen und zwar, wie naheliegend war, in Ausführung als Motorzähler, um hierbei gleich die beim Bau von Wattstunden-Motorzählern gewonnenen Erfahrungen nutzbar zu machen.

Die auch als Amperestundenzähler ausgeführten Modelle des Siemensschen Säbelzählers und Präzisions-Gleichstromzählers verschwanden gleichzeitig mit der Aufgabe dieser Typen als Wattstundenzähler. Aron selbst gab nach einigen Jahren den Bau von Amperestundenzählern auf, da sich dieselben nur wenig billiger stellten, als seine Wattstundenzähler. Es fiel hiermit für seine Kundschaft der wesentliche Ansporn zur Anschaffung der Amperestundenzähler fort, für ihn selbst die Zweckmäßigkeit und Notwendigkeit, diese Zählertype weiter zu fabrizieren.

15. O'K-Zähler.

Während nun die bisherigen Konstruktionen der Amperestundenzähler stets nur mehr oder minder abgeänderte Ausführungsformen der betreffenden Wattstunden-Zählertype waren, um bei möglichst einfacher Fabrikation beiden Ansprüchen zu genügen, brachte um 1900 O'Keenan, Paris, einen ausge-

sprochenen Amperestundenzähler, nach ihm O'K.-Zähler, in Deutschland auch nach der ihn herstellenden Firma „Danubia-Zähler“ benannt, auf den Markt, der nur als solcher zu gebrauchen war und auf dem neuartigen Meßprinzip beruhte, daß der nach Art eines Präzisions-Gleichstrominstrumentes an einen konstanten Nebenschlußwiderstand gelegte Zähler, ein kleiner magnetelektrischer Motor, bei möglichst verringerter Reibung und peinlichst vermiedener elektromagnetischer Wirbelstromdämpfung jeglicher Art stets eine solche Geschwindigkeit annimmt, daß die hierdurch erzeugte Gegen-EMK. fast genau gleich der von der Stromstärke abhängenden Klemmspannung an den Enden des Nebenschlusses ist. Die Messung fällt daher um so genauer aus, je geringer die mechanische Reibung ist und je sorgfältiger jede Wirbelstromdämpfung vermieden ist. Der Zähler stellt also ein nach dem Prinzip der DEPREZ-D'ARSONVAL-Instrumente gebautes Amperemeter dar, mit dem Unterschiede, daß die jeweilige Stromstärke nicht in dem Ausschlag des Zeigers, sondern in der Geschwindigkeit der rotierenden Stromspule ihren Ausdruck findet. Die fortlaufende Registrierung dieser Geschwindigkeit durch ein mechanisches Zählwerk macht dann dies Amperemeter zu einem zeitlich registrierenden und zwar integrierenden Instrument, d. h. zu einem Coulomb- oder Amperestundenzähler. Dieser Apparat steht heute noch in ausgedehnter praktischer Anwendung und sei hiermit auf die spätere genaue Beschreibung verwiesen. Heute werden diese Zähler, nur mit gewöhnlicher elektromagnetischer Wirbelstromdämpfung, da das vorstehend geschilderte Prinzip der Kompensation des OHMschen Spannungsabfalles durch die Gegen-EMK. der Bewegung O'KEENAN geschützt ist, fast von allen Firmen dieser Spezialbranche ausgeführt. Wie schon gelegentlich der Wattstunden-Motorzähler bemerkt wurde, bevorzugt man hierbei neuerdings aus praktischen Gründen als Ankerform den einfachen Spulenanker.

16. Quecksilbermotorzähler.

Es muß hier noch einer Sonderkonstruktion des Motorelektrizitätszählers gedacht werden, der meistens als Amperestundenzähler ausgeführt in England und Amerika eine große Verbreitung gefunden hat, während man sich in Deutschland, ähnlich wie bei dem Elektrolytzähler hiermit nicht hat befreunden können. Gemeint sind die nach Art der FARADAYschen Scheibe oder des BARLOWschen Rades gebauten Zähler, die man einmal nach dem ihnen zugrunde liegenden elektrischen Konstruktionsprinzip als „Unipolarzähler“, dann nach der Art der verwendeten Stromzuführung als „Quecksilberzähler“ bezeichnen kann. Die erste Benennung dürfte prägnanter sein. Die Apparate besitzen meistens ein von einem permanenten Magneten erzeugtes möglichst gleichmäßiges Feld von einer der Form des Ankers entsprechenden mechanischen Gestaltung. Der Anker, eine Scheibe oder Glocke aus Metall, meistens Kupfer, erhält den Strom durch eine Quecksilberschicht zugeführt, die ihm oft noch zur Verminderung der Reibung einen Auftrieb nach oben erteilt. Sind hiermit auch die Schwierigkeiten der Stromwendung behoben, so kommen anstelle dessen andere mechanische, aus der flüssigen Natur des Stromzuführungsmittels sowie aus der zeitlich veränderlichen Reibung zwischen Anker und Quecksilber sich ergebend, hinzu. Dies Prinzip der Quecksilberzähler, in England durch den FERRANTI-Zähler, sowie die Konstruktionen der Firma CHAMBERLAIN & HOOKHAM vertreten, wird neuerdings von der amerikanischen Firma SANGAMO ELECTRIC Co. auch auf Wattstundenzähler ausgedehnt, und zwar, eine sehr interessante Neuerung, außer auf Gleichstromzähler, auch auf Wechselstrom-Wattstundenzähler.

17. Induktionszähler.

Während nun die bisher betrachteten Wattstundenzähler ihrem Prinzip nach gleicherweise für Gleich- wie Wechselstrom Verwendung finden konnten, war dies bei den letztgenannten mit permanenten Magneten ausgerüsteten Amperestundenzählern nicht der Fall. Man gebrauchte daher in Wechselstromanlagen ausschließlich Wattstundenzähler, da es vielleicht mit der einzigen Ausnahme eines von BRUGER angegebenen Wechselstrom-Amperestundenzählers solche Apparate nicht gab, als welche man neben dem ARONschen Pendelzähler und dem SIEMENSschen Säbelzähler meistens den gewöhnlichen auf dynamometrischem Prinzip beruhenden THOMSON-Zähler anwendete, der ursprünglich überhaupt für Wechselstrom entworfen war. Ergaben sich auch hierbei aus den Induktions- und Selbstinduktionserscheinungen noch größere praktische Unzuträglichkeiten am Kommutator und allgemeiner Art als bei dem Gleichstrombetrieb, so mußte man wohl oder übel bei diesen Apparaten so lange stehen bleiben, bis das Mehrphasen-Instruktionsprinzip die Konstruktion weit einfacherer und sicherer Spezial-Wechselstromzähler ermöglichte, d. h. solcher Apparate, die in gleicher Weise nur für Wechselstrom benutzbar sind, wie der vorerwähnte O'KEENAN-Amperestundenzähler nur zur Messung gleichgerichteter Ströme verwendet werden kann.

Es ist über die Entdeckung dieses Induktionsprinzipes namentlich in seiner Anwendung auf Wechselstrom-Motorzähler viel geschrieben und gestritten worden, ohne daß man zu einem allgemein anerkannten Ergebnis gekommen ist. So verständlich bei der allerdings sehr großen Bedeutung des Mehrphasen-Induktionsprinzipes in der Wechselstrom-Motoren- und Meßtechnik auch das Bestreben der verschiedenen Interessentengruppen ist, das Verdienst und die Priorität für eine bestimmte Person in Anspruch zu nehmen. so schwer erscheint es doch, hierin zu einem allseitig befriedigenden Resultate zu gelangen. Denn auch hier, wie bei anderen Prioritätsstreitigkeiten muß die Frage aufgeworfen werden, wer denn eigentlich mit Fug und Recht die wahre und praktisch bedeutungsvolle Priorität für sich in Anspruch nehmen kann, ob derjenige, der zuerst die Idee, die Möglichkeit der Ausführung ausgesprochen hat, oder weiter derjenige, der den ersten Apparat, wenn auch noch sehr mangelhaft und oft praktisch gar nicht brauchbar, oder endlich derjenige, der den ersten auf völlig richtiger, theoretischer Grundlage beruhenden und praktisch verwendbaren Apparat gebaut hat. Es erscheint billig, das Verdienst auf die verschiedenen an dieser Entwickelung von Prinzip und praktischer Nutzanwendung beteiligten Personen zu verteilen.

So soll auch hier vorstehenden Überlegungen zufolge die Frage offen gelassen werden, wem die Priorität in der Erfindung der Wechselstrom-Induktionsmotorzähler und Instrumente zuzuerkennen sei. Zweifellos hat hieran einen hervorragenden Anteil Prof. GALILEO FERRARIS, der sich mit dem Deutsch-Amerikaner NICOLA TESLA in den Ruhm teilt, unabhängig voneinander das Mehrphasenprinzip gleichzeitig entdeckt zu haben. FERRARIS, der auf Grund der irrtümlichen Deutung einer mathematischen Ableitung, die Maximalarbeit der von ihm angegebenen elektrodynamischen Rotationsapparate betreffend, der Anwendung dieses Prinzipes für motorische Zwecke unberechtigterweise ein sehr schlechtes Prognostikon stellte, wohl aber sofort richtig die große Bedeutung desselben für die Wechselstrom-Meßtechnik erkannte, hatte die doppelte Freude, zu erleben, wie sein pessimistisches Urteil, die Anwendung dieses Instruktionsprinzipes in der Motorentechnik betreffend,

sich als unbegründet herausstellte, das andere günstige jedoch sich in der Meßtechnik vollauf bestätigte.

Nachdem das Prinzip der Induktionswirkung verketteter Wechselströme, praktisch meistens abgekürzt, wenn auch ungenau „Drehstrom" genannt, durch FERRARIS und TESLA fast gleichzeitig bekannt gegeben war, erkannte man auch bald den natürlichen Zusammenhang mit den bekannten einfachen Induktionserscheinungen und lernte es, bekannte analoge Anordnungen, wie die ARAGOsche Scheibe, von anderen Gesichtspunkten aus zu betrachten und zu verstehen. Ohne sich in den einzelnen Fällen des genauen Zusammenhanges klar zu werden, und von verschiedenen Gesichtspunkten und Absichten ausgehend, wurden fast gleichzeitig mit der Entdeckung der Mehrphaseninduktion Anordnungen bekannt, wonach man auch bei einfachem Wechselstrom mittels Unsymmetrien im magnetischen Felde, oder durch in einem Teile desselben angebrachte Kurzschlußwindungen oder durch Spaltung des Wechselstromkreises in zwei Zweigströme mit verschiedener Zeitkonstante ähnliche induktionsmotorische Wirkungen auslösen konnte. Die hohe Bedeutung dieser unter der Bezeichnung des „THOMSON-Effektes" bekannten Erscheinungen für die Konstruktion von Wechselstrom-Meßapparaten wurde bald nach ihrer Entdeckung erkannt und praktisch verwertet. Dies war um so natürlicher, als ja ihr Entdecker Prof. E. THOMSON wie wir schon sahen, gleichzeitig der Autor des ersten praktischen Gleichstrom-Motorzählers war. Es entstanden die ersten noch sehr unvollkommenen Wechselstrom-Motorzähler von THOMSON, FERRANTI, SHALLENBERGER, DUNCAN, SWINBURNE u. a.

In Deutschland fand der Induktionszähler seine erste praktische Ausführung in dem von BLATHY konstruierten Wechselstrom-Motorzähler der Firma GANZ & Co., Budapest, der in Deutschland von der s. Z. HELIOS ELEKTRIZITÄTS-A.-G. vertrieben wurde, und der für die Mehrzahl der darauffolgenden Konstruktionen bis auf den heutigen Tag als typisch anzusehen ist. Eine Metallscheibe unterliegt hierbei der Induktionswirkung zweier Wechselstrommagnete, deren einer, mit wenigen starken Windungen versehen, den Betriebsstrom führt, während die andere mit vielen dünnen Windungen bewickelte Spule direkt oder unter Zwischenschaltung einer Drosselspule an der Netzspannung anliegt und daher von einem derselben proportionalen, aber in der Phase stark gegen dieselbe verschobenen Strom durchflossen wird. Die im Felde dieser beiden Magnete drehbar angeordnete Scheibe gerät unter der Wechselwirkung der von diesen beiden phasenverschobenen Wechselfeldern in ihr induzierten Ströme in Rotation, die in bekannter Weise mittels Schnecke und Zahnrad-Übertragung an einem Zählwerk abgelesen wird. Die innerhalb einer bestimmten Zeit erfolgten Umdrehungen bilden ein Maß der verbrauchten Energie, da das von den beiden Wechselstrommagneten auf die Scheibe ausgeübte Drehmoment annähernd proportional den Strömen in beiden Magnetwickelungen, d. h. Strom und Spannung, und dem Sinus ihrer Phasendifferenz ist. Die bei verschiedenen Belastungen erforderliche Proportionalität der Umdrehungszahlen zur Belastung wird in gleicher Weise wie bei den Gleichstrom-Motorzählern durch Anwendung der magnetischen Dämpfung erzielt, und zwar wird hier dieselbe Scheibe, die das nutzbare Drehmoment in dem einen Teile erzeugt, hierzu in dem anderen Teile benutzt, indem man sie der Wirkung eines permanenten

Magneten aussetzt. Für einfachen Lichtbetrieb ist dieser Zähler noch heute brauchbar.

In je größerem Umfange nunmehr der Wechselstrom, namentlich nach der gelungenen Kraftübertragung Lauffen-Frankfurt a. M. 1891, an Bedeutung gewann und in Praxis Einführung fand, um so mehr stellte sich das Bedürfnis nach einem guten Wechselstromzähler heraus, um so mehr wandte man sich von dem rein elektrodynamischen Kommutatorzählern ab und dem kommutatorlosen Induktionszähler zu. Die Vorzüge waren zu offenkundig: Abwesenheit der stromwendenden und unterbrechenden Teile, feste Anordnung aller Stromspulen, der einzige rotierende Körper eine relativ leichte unbewickelte Metallscheibe, großes mechanisches Drehmoment usw., als daß es nicht den Ehrgeiz der Techniker und Gelehrten gereizt hätte, hierauf aufbauend einen vollkommenen, allen bisherigen Anforderungen der Wissenschaft und Praxis entsprechenden Wechselstromzähler zu konstruieren. Denn die im Anfange der Wechselstromtechnik nur wenig verbreitete und noch dazu mangelhafte Kenntnis der Wechselstromerscheinungen und ihrer theoretischen Beziehungen brachte es mit sich, daß diese ersten Konstruktionen, obwohl sie schon Eingang in die Praxis gefunden hatten, von ihren mechanischen Unvollkommenheiten ganz abzusehen, teilweise noch nach direkt unrichtigen Prinzipien entworfen waren. Wie überall war auch hier die Erkenntnis der Mangelhaftigkeit der erste Schritt zu ihrer Abhilfe.

Es handelte sich hierbei darum, den Wechselstrom-Induktionszähler nach zwei Richtungen hin zu vervollkommnen, seine Angaben einmal von der Art der Belastung, ob induktiv oder induktionsfrei, unabhängig, zweitens ihn selbst der Messung verschiedenartig belasteter Mehrphasensysteme fähig zu machen.

18. Bedingung von 90° Phasendifferenz zwischen Strom- und Spannungsfeld.

Wie schon angedeutet, und aus dem Prinzip hervorgeht, muß zum genauen Arbeiten eines einfachen Wechselstromzählers, d. h. eines Einphasenzählers zwischen dem Hauptstrom- und Spannungsfeld im Zähler eine Phasendifferenz von 90° geschaffen werden. Die anfänglich gewählte Maßnahme, das Spannungsfeld durch sehr starke Selbstinduktion um „fast" 90° zu verschieben, genügte schließlich für Lichtbetrieb, dagegen für die mehr und mehr an Bedeutung gewinnenden Zentralen mit überwiegendem Motorenbetrieb und Transformatorbelastung und den dabei unvermeidlich auftretenden großen Phasenverschiebungen nicht. Es galt also neue Mittel und Wege zu finden, um den einfachen Wechselstrom-Motorzähler für beide Art Belastungen, praktisch induktionsfreie wie stark induktive, gleich geeignet zu machen. Die von den verschiedenen Seiten, darunter den meisten Großfirmen aufgenommenen Arbeiten zur Entwickelung eines brauchbaren Wechselstrom-Motorzählers hatten daher in erster Linie die Lösung der Aufgabe zum Zweck, eine vollkommene Phasenverschiebung des Spannungsfeldes um 90° zu schaffen, um den Zähler ebenso für induktionsfreie wie stark induktive Belastung geeignet zu machen. Es sind hier die Arbeiten von Raab, Shallenberger, Bruger, Theiler, Hummel und Görges von entscheidendem Einfluß gewesen. Es hat ziemlich lange gedauert, ehe über die hierbei einzuschlagenden Methoden völlige Klarheit erzielt wurde. Der vorstehenden Bedingung, daß das Spannungsfeld zu dem der Hauptstromspule 90° Phasendifferenz aufweisen soll, kann in mehrfacher Weise Genüge geleistet werden.

durch Superposition von magnetischen Feldern, die von verschiedenen herrühren, was annähernd gleichzeitig von Raab und Shallenberger

ausgegeben wurde. Dann durch Verschieben der Phase des erregenden Stromes, wie es HUMMEL durch Parallelschalten induktionsfreien Widerstandes zur Nebenschlußspule tat, und wie es durch transformatorische Verkuppelung des Nebenschlußstromes mit Hilfsströmen und Feldern nach BRUGER möglich ist. Um der das Nebenschlußfeld erregenden Spannung direkt die gewünschte Verschiebung zu erteilen, ersann GÖRGES seine bekannte Brückenschaltung.

Auf die jedoch hierbei zu beobachtende Rückwirkung der in dem Anker des Motorzählers induzierten Triebströme wies STERN hin und bewies durch die Konstruktion des nach den THEILERschen Patenten hergestellten Zählers der s. z. Union Elektrizitätsgesellschaft, daß mit Benutzung dieser sekundären Ankerströme die gewünschte Verschiebung des Spannungsfeldes um 90° einfach durch zweckmäßige Bemessung und Regulierung einer der Spannungsspule vorzuschaltenden Drosselspule von induktionsfreiem Widerstand möglich ist. Die heutigen Zähler arbeiten vielfach mit dem von HUMMEL angegebenen Hilfsmittel der Parallelschaltung von bifilarem Widerstand zur Spannungsspule.

19. Mehrphasenzähler.

Die erwähnten Entdeckungen von FERRARIS und TESLA hatten aber nicht so sehr dem einfachen Wechselstrom als vielmehr den verketteten Wechselströmen, dem Mehrphasenstrom zur industriellen Anwendung verholfen. Daher trat an die Wechselstrom-Meßtechnik die weitere wichtige Aufgabe heran, einen zuverlässigen und einfachen Mehrphasenzähler zu schaffen, insbesondere für die einfachste und praktisch bedeutsamste Form des Dreiphasensystemes, des Drehstroms. Hierbei komplizierte sich nun die Aufgabe dadurch weiter, daß die Messung dieser phasenverschobenen Wechselströme nach jeder Richtung hin genau und leicht möglich sein muß, was die Verschiedenheit der Belastung in quantitativer wie in qualitativer Beziehung betraf. D. h. ob ein oder der andere Zweig schwach, gar nicht, oder maximal belastet ist, ob vorzugsweise mit Lichtbetrieb oder durch Motoren und Transformatoren. muß auf die Messung ohne Einwirkung bleiben.

Handelte es sich um Teilnehmeranschlüsse mit reinem Motorenbetrieb, so war die Aufgabe relativ einfach. Die praktisch zulässige Annahme, daß der an alle Phasen angeschlossene Mehrphasenmotor dieselben gleichmäßig belastet, ermöglichte es, sich mit der Registrierung des Energieverbrauches in nur einer Phase zu begnügen. Ein für induktive Belastung gebauter einfacher Wechselstromzähler, nötigenfalls mit einem im Spannungssystem künstlich durch Widerstände geschaffenen Nullpunkt, genügt den Anforderungen.

Für größere Anschlüsse mit gemischtem Licht- und Motorenbetrieb mußte jedoch die vorstehend skizzierte schwierigere Frage gelöst werden, einen Mehrphasenzähler für jede Art Belastung in allen Zweigen zu schaffen. Über die theoretischen Beziehungen und Bedingungen schufen die auf dem Gebiete der Mehrphasenströme bahnbrechenden Arbeiten hervorragender Wechselstromtechniker wie DOLIVO-DOBROWOLSKI, GÖRGES, ARON, BEHN-ESCHENBURG u. a. die erwünschte Klarheit. Hier war es wiederum ARON, dessen Verdienste um die Zählerentwickelung schon gewürdigt sind, der, die Entwickelung der Wechselstromtecknik aufmerksam verfolgend, seinen in erster Linie für Gleichstrom konstruierten Zähler auch sofort den Anforderungen der anderen Stromart entsprechend ausführte. ARON war hier von vorn herein stark im Vorsprung. Sein Pendelzähler war im gleichen

Maße, wie er von den den anderen Gleichstrom-Motorzählern anhaftenden Übelständen der Stromwendung und mechanischen Reibung frei war, hiervon auch in seiner Anwendung bei Wechselstrombetrieb unbeschwert und konnte daher ebenso zur Messung gleichgerichteter wie harmonischer Ströme dienen. Da sein auf rein dynamometrischem Prinzip beruhender Zähler keine Verschiebung der Spannungsphase um genau 90° nötig hatte, so blieb für Aron nur die Schwierigkeit der möglichst genauen und einfachen Messung der Mehrphasensysteme übrig. Er gab nach anfänglich komplizierten Konstruktionen von Zählern mit 3—4 Strom- und Spannungsystemen 1892 die vereinfachte Formel für die Messung irgendwie belasteter Dreiphasensysteme an, die dieselbe durch 2 gleichzeitige Messungen mittelst nur zweier Stromsysteme auszuführen gestattete, was für die Meßtechnik einen zweifellosen großen Fortschritt darstellte. Aron erlangte sogar auf diese Neuerung ein Patent, wiewohl die Patentierung von mathematischen, physikalische Beziehungen wiedergebenden Formeln sehr anfechtbar ist, und sicherte hierdurch seinem Dreiphasen-Pendelelektrizitätszähler in dem nunmehr entbrennenden Wettstreit um die Schaffung eines brauchbaren Dreiphasenzählers einen großen Vorsprung und eine ähnliche bevorzugte Stellung, wie dieselbe schon sein Gleichstromzähler besaß. Die Mannigfaltigkeit der dem Dreiphasensystem innewohnenden Beziehungen physikalischer wie mathematischer Natur und das Streben der Konkurrenz, sich von dem durch die Patentierung der Aronschen Formel geschaffenen Monopol frei zu machen, zeitigten in den darauffolgenden Jahren bis in die jüngste Zeit hinein eine große Anzahl derartiger Meßmethoden, die zum Patent angemeldet wurden, zum großen Teile auch mit Erfolg, und die sich auf alle möglichen Kombinationen und Modifikationen der Dreiphasenmessung, der Bewickelung der betreffenden Instrumente etc. beziehen. In den meisten Fällen läßt sich der enge Zusammenhang mit der Aronschen Zweiwattmeter-Methode leicht nachweisen. Nach dem Erlöschen des Aronschen Patentes gingen daher fast alle Fabrikanten zu der Zweiwattmeterschaltung über.

Von den verschiedenen Mehrphasensystemen stellte sich wie bemerkt das einfache Dreiphasensystem als das wichtigste heraus. In einzelnen Fällen gelangten jedoch Abänderungen hiervon, wie namentlich als Dreiphasensystem mit besonderer neutraler Rückleitung zur Ausführung. Es sind hierfür von Aron wie anderen Firmen Spezialkonstruktionen des gewöhnlichen Drehstromzählers entworfen worden.

20. Tarifsysteme. Eine so glänzende Entwickelung die Elektrotechnik nun auch allerorten namentlich in technischer Beziehung nahm, besonders in ihrer Anwendung für motorische Zwecke, so ergab sich doch — und zwar bis auf den heutigen Tag — daß sich die elektrische Energie für die überaus wichtige Erzeugung von Licht noch viel zu teuer stellt. Die einfache Petroleumlampe und das Gasglühlicht bildeten ernsthafte Konkurrenten, die der Einführung der elektrischen Kraft in die Praxis für ausgedehnte Benutzung hindernd in den Weg traten. Der Erfolg war ein doppelt schmerzlicher, für die Elektrizitätswerke, wie für die Allgemeinheit: Erstere, namentlich in kleineren Städten rentieren zu wenig, der Verbraucher des elektrischen Stromes dagegen klagt über zu hohen Preis desselben.

Bleiben wir zunächst bei der Zentrale. Eine Hebung ihrer Rentabilität ist in erster Linie zu erstreben, da sie es allein möglich macht, auch den Kunden davon etwas durch Ermäßigung des Tarifes profitieren zu lassen.

Man erkannte bald nach Einführung und Errichtung der elektrischen Zentralstationen, daß das in vielen Fällen unbefriedigende pekuniäre Ergebnis derselben an der zu ungleichmäßigen Belastung liegt. Man suchte daher die Rentabilität des Werkes dadurch zu heben, daß man durch Einräumung eines ermäßigten Preises in den Stunden schwächerer Belastung einmal neuere Konsumenten anzulocken, und auf die bereits angeschlossenen so einzuwirken sich bemühte, daß dieselben, soweit es überhaupt die Verwendungsart der elektrischen Energie zuläßt, den ihnen nötigen Strom vorzugsweise in diesen Stunden entnahmen. Dies machte die Konstruktion von Zählern bzw. Zusatzapparaten nötig, die in den einzelnen Tagesstunden nach verschiedenem Tarif, meistens dem Zweifach- oder Doppeltarif registrieren. Das Resultat kann hierbei getrennt oder als Gesamtsumme, in Kilowattstunden oder oft sogar direkt in der betreffenden Geldsorte abgelesen werden. Es kann hierbei ein Zähler mit zwei verschiedenen Zählwerken versehen sein, die mechanisch oder elektrisch zu bestimmten Tageszeiten umgeschaltet werden, es können aber auch getrennte Zähler hierfür in Anwendung kommen.

21. Spezialkonstruktionen.

Solche Apparate fallen natürlich komplizierter und teurer aus wie gewöhnliche Zähler und kommen daher meistens nur für größere Zentralen in Betracht. In kleineren Elektrizitätswerken, wo auch auf diesem Wege nur wenig zu erzielen ist, müssen zur Hebung der Rentabilität nach Möglichkeit die Produktions- und Verteilungskosten niedrig gehalten werden. Hier spielt auch die Zählermiete, die wiederum von dem Anschaffungspreis der Apparate abhängt, eine wichtige Rolle, und hier sind sogar in manchen Fällen noch die billigeren Amperestundenzähler zu teuer. Man wendet dann, namentlich wo es sich um annähernd gleiche Belastung, wie bei kleinen Motoren, handelt, die noch einfachere Form des Elektrizitätzeitzählers, bei Lichtbetrieb auch häufig Lampenstundenzähler genannt, an. Diese Apparate, aus einem elektrisch oder mechanisch getriebenen Uhrwerk bestehend, werden durch den Verbrauchsstrom oder die Netzspannung nur so lange in Betrieb gehalten, als Strom verbraucht wird.

Schließlich hat auch das Prinzip des selbsttätigen Verkaufes von Elektrizität durch Automaten ähnlich den Gasautomaten zur Konstruktion derartiger Apparate geführt, die sich in manchen Fällen in der Praxis als vorteilhaft erwiesen haben.

Den sehr verschiedenartigen Zwecken und praktischen Bedürfnissen entsprechend haben sich weiterhin Spezialkonstruktionen des Elektrizitätszählers herausgebildet, die namentlich in der mechanischen Ausführung von den übrigen marktgängigen Typen abweichen. Es seien hier erwähnt die Akkumulatorenzähler, die an besonderen Zifferblättern die im einen und anderen Sinne den Apparat durchflossen habenden Lade- und Entladungsströme anzeigen, die Schalttafelzähler, die wegen der meistens sehr großen Stromstärken und ihrer Anordnung an der Schalttafel besondere Konstruktionen nötig machen, die Straßenbahnzähler für diese Art und andere automobile Fahrzeuge, bei denen eine äußerst möglichst elastische Lagerung und robuste Konstruktion das Haupterfordernis bilden.

Jedenfalls hat sich in der gesamten Entwickelung des Zählerbaues der Motorelektrizitätszähler als die wichtigste Ausführungsform erwiesen.

II.

Einteilung der Elektrizitätszähler.

22. Die verschiedenen Zählersysteme. Wie aus vorstehenden Ausführungen hervorgeht, wird der Elektrizitätszähler seinem verschiedenen Zweck, Stromart und Konstruktionsprinzip zufolge in mannigfacher Weise ausgeführt, und ist es nicht leicht, eine einfache Übersicht der heute hergestellten und in Anwendung stehenden Zählertypen zu geben. Es geht das schon aus der vielfach kombinierten Benennung hervor, deren man bedarf, um bestimmte Apparate dieser Gattung eindeutig zu bezeichnen. So folgt schon aus der Bezeichnung des „Zweileiter-Gleichstrom-Flügelwattstunden-Doppeltarif-Motor-Elektrizitätszähler" — so könnte man wenigstens korrekter Weise einen von den SIEMENS-SCHUCKERT-Werken, Berlin, hergestellten Zähler benennen, wenn man sich auch in Wirklichkeit mit einem einfacheren Titel begnügt —, nach wieviel Richtungen dieser Apparat von ähnlichen Zählern einer Unterscheidung bedarf.

Um daher eine sowohl umfassende wie auch klare Übersicht der heute hergestellten verschiedenen Zählertypen zu geben, ist es ebenso zweckmäßig wie überhaupt nur praktisch ausführbar, auf die Einordnung der gesamten Systeme in eine Tabelle zu verzichten, dieselben vielmehr nach drei Gesichtspunkten zu betrachten, wie dies nachstehend auch geschehen ist, nämlich 1. nach der zu messenden Stromart, 2. nach der Art der Berechnung und dem besonderen praktischen Zweck, 3. nach dem Meß- und Konstruktionsprinzip des Zählers.

Zählersysteme.

A. Nach der Stromart.

I. Gleichstromzähler:
  a) Zweileiterzähler,
  b) Dreileiter- und Mehrleiterzähler.

II. Wechselstromzähler:
  a) Einphasenzähler,
  b) Drei- und Mehrphasenzähler.

B. Nach Art der Berechnung und besonderem Zweck.

I. Elektrizitätszeitzähler und Lampenstundenzähler.

II. Amperestundenzähler.

III. Wattstundenzähler.

IV. Zähler für besondere Zwecke:
   a) Doppeltarifzähler,
   b) Akkumulatorenzähler,
   c) Elektrizitätsautomaten oder Selbstverkäufer,
   d) Elektrizitätszähler in besonderer mechanischer Ausführung für Schalttafeln, Straßenbahnwagen, Elektromobile usw.

C. Nach dem elektrischen Meß- und Konstruktionsprinzip.

I. Zähler nach elektrolytischem Prinzip.

II. Elektrizitätszähler mit einem den Ausschlag eines elektrischen Meßinstrumentes periodisch registrierenden Uhrwerk.

III. Pendelelektrizitätszähler.

IV. Motorelektrizitätszähler:
   a) auf magnet-elektrischem Prinzip beruhende Gleichstrom-Amperestundenzähler,
   b) auf dynamometrischem Prinzip beruhende Gleich- und Wechselstrom-Wattstundenzähler mit und ohne Eisen als
      1. Rotationszähler,
      2. Oszillationszähler,
   c) auf Mehrphasen-Induktionsprinzip beruhende Wechselstrom-Wattstundenzähler als
      1. Einphasenzähler,
      2. Mehrphasenzähler für gleiche Belastung der Phasen,
      3. Mehrphasenzähler für beliebige Belastung der Phasen.

Die Beschreibung der heute praktisch angewendeten Elektrizitätszählersysteme könnte also nach den drei in A, B, C vorstehender Übersicht enthaltenen Gesichtspunkten erfolgen. Zweckmäßig geschieht dies jedoch nach der letzten Einteilung unter C, dem elektrischen Meß- und Konstruktionsprinzip, was auch annähernd der historischen Entwickelung entspricht, indem heute überwiegend nur die Gruppen C, III und IV in Gebrauch stehen.

Die Einteilung unter B, nach Art der Berechnung und besonderem Zweck bedarf nach den Ausführungen der historischen Entwickelung keiner näheren Erläuterungen, besonders da die angeführten wichtigeren Spezialkonstruktionen am Schlusse der Beschreibung der wichtigsten heutigen Ausführungsformen nach dem unter C enthaltenen Gesichtspunkt eine besondere Besprechung finden. Dagegen erscheint es zweckmäßig, über die Einteilung der Zähler nach den verschiedenen Stromarten einige Bemerkungen vorauszuschicken und die wichtigsten hierbei zur Anwendung kommenden Schaltungen anzugeben.

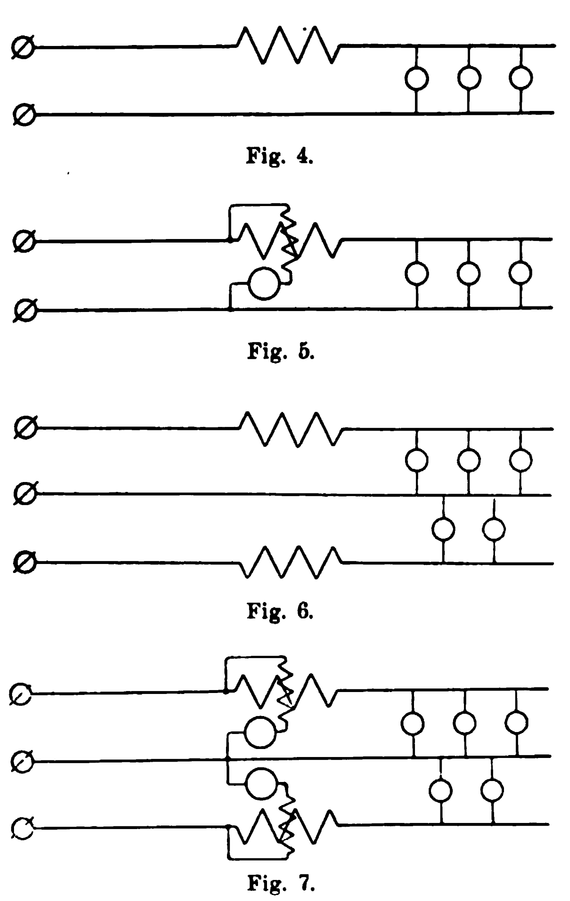
23. Zähler für verschiedene Stromart.

Den beiden Hauptarten des elektrischen Stromes entsprechend, Gleichstrom und Wechselstrom, unterscheidet man ebenfalls zwischen Gleichstromzählern und Wechselstromzählern, welche meistens in verschiedener Weise konstruiert sind. Es hängt von dem betreffenden elektrischen Meßprinzip ab, ob der Zähler ausschließlich für die eine oder andere Stromart oder für beide gleichzeitig brauchbar ist. So können die auf elektrolytischem und magnet-elektrischem Prinzip (Drehspulensystem) beruhenden Zähler nur für gleichgerichtete Ströme, nach dem Induktionsprinzip arbeitende Messer dagegen ausschließlich nur für Wechselstrom benutzt werden. Nun sind zwar bestimmte Wirkungen des elektrischen Stromes beiden Stromarten gemein-

sam, wie die thermischen, elektromagnetischen (Solenoidwirkung) und die vornehmlich zur Konstruktion von Elektrizitätszählern benutzten elektrodynamischen Erscheinungen, und sind daher z. B. die auf letzterem Prinzip beruhenden Zähler von vornherein ebenso für Gleich- wie für Wechselstrom brauchbar. Die genauere Durchbildung der Zähler in ihren mechanischen Einzelheiten, besonders aber die Entdeckung des für die Wechselstrommessung so vorteilhaften Induktionsprinzipes brachte es aber mit sich, daß das elektrodynamische Prinzip mit einer einzigen Ausnahme (Aron-Zähler) heute praktisch nur für Gleichstrom benutzt wird, wenn auch verschiedene andere Konstruktionen (wie namentlich auch der Thomson-Zähler) auch für Wechselstrommessungen benutzt werden können. Es ergibt sich also, daß die Elektrizitätszähler gegenwärtig mit verschwindend geringen Ausnahmen besondere Konstruktionen für Gleich- wie für Wechselstrom aufweisen.

24. Gleichstromzähler.

Das Gleichstromsystem wurde ursprünglich in der einfachsten Form der Zweileiterschaltung benutzt, und waren daher die ersten Zähler Zweileiterzähler. Im Anfang meistens als Amperestundenzähler ausgeführt, ging man nach einigen Jahren infolge gesteigerter Ansprüche an Genauigkeit in den meisten mittleren und größeren Zentralen zur Einstellung von Wattstundenzählern über. Der Zweileiter-Amperestundenzähler Fig. 4 besitzt nur eine Stromspule, die vom Hauptstrom durchflossen wird, ist also wie ein Amperemeter geschaltet. Der Zweileiter-Wattstundenzähler weist, wie das Schema der Fig. 5 ergibt, die gleiche Schaltung wie ein Wattmeter auf.


Fig. 4.
Fig. 5.
Fig. 6.
Fig. 7.

Die zunehmende Anwendung des elektrischen Stromes und die hiermit steigenden Kabelkosten und Stromverluste führten zu dem Dreileitersystem, welches die Vorteile der einfachen und doppelten Spannung bis zu einem gewissen Grade miteinander verbindet. Die entsprechenden Schaltungen des Dreileiter-Amperestunden- und Wattstundenzählers sind in den Figuren 6 und 7 wiedergegeben. Man kann hierbei die Spannungsspulen ohne jede Verbindung mit dem Mittelleiter lassen, wofern auch bei verschiedener Belastung der beiden Zweige die Spannungen in denselben gleich gehalten werden. Da dies praktisch nicht mit genügender Genauigkeit zutrifft, so ist die in Fig. 7 dargestellte Schaltung vorzuziehen, bei der beide

Spannungskreise an den Mittelleiter angeschlossen sind. Zu beachten ist bei allen Wattstundenzählern, daß die Spannungsspule direkt von dem zu ihr gehörigen Hauptstromleiter abgezweigt und dann erst über den Zusatzwiderstand mit dem anderen Pol verbunden wird, um zwischen beiden Stromspulen, insbesondere bei Hochspannung, nicht unnötigerweise fast die ganze Betriebsspannung auftreten zu lassen. Es ist weiterhin im Interesse der Genauigkeit der Messung darauf zu achten, daß die beiden Starkstromsysteme in solcher Weise und Entfernung zueinander angeordnet sind, daß keine ungebührliche magnetische Beeinflussung des einen Starkstromsystems auf die Spannungsspule des anderen Systems stattfindet.

In manchen Fällen erschien selbst das Dreileitersystem unzureichend und erweiterte man es alsdann zu Vier- und Fünfleitersystemen, um durch Einführung noch höherer Spannungen bis 400 und 500 Volt weitere Ersparnisse an Strom und Leitungsmaterial zu machen. Infolgedessen mußten nach Art des Dreileiterzählers auch Vier- und Fünflleiterzähler konstruiert werden. Die bald darauf folgende Einführung der Wechselstrom-Mehrphasensysteme ließ diese Mehrleiter-Gleichstromsysteme alsbald verschwinden.

25. Wechselstromzähler.

Der Wechselstrom, obwohl die ursprünglichere Stromart, mußte in den ersten Jahren der Elektrotechnik dem Gleichstrom in den meisten Fällen aus bekannten Gründen (keine Möglichkeit direkter Aufspeicherung, nicht mit Last anlaufende Motoren, schlechterer Wirkungsgrad der Bogenlampen) das Feld räumen bzw., von vornherein überlassen. Wo in älteren Anlagen oder in vereinzelten Fällen der bequemeren Transformierung wegen dennoch Wechselstrom benutzt wurde, geschah dies in der einfachen Form des Zweileitersystems, des Einphasenstroms. Amperestundenzähler für Wechselstrom sind vielleicht mit der einzigen Ausnahme des auf dem Induktionsprinzip beruhenden Brugerschen Amperestundenzählers nie benutzt worden. Die Schaltung der Wechselstrom-Wattstundenzähler, der auf einfacher elektrodynamischer Wirkung beruhenden Aronzähler, des älteren Siemensschen Säbelzählers und des Thomsonschen Motorzählers ist hierbei identisch mit Fig. 5. Das Dreileitersystem kann in gleicher Weise auf Wechselstrom übertragen werden und weist mit der bei dem Einphasenzähler angegebenen Beschränkung auf bestimmte Zählertypen die gleiche Schaltung des Dreileiter-Gleichstromzählers nach Fig. 7 auf.

Die bei dem Wechselstrom-Induktionszähler im Spannungskreise benutzten zur Erzielung der Verschiebung der Spannungsphase auf 90^0 nötig werdenden Schaltungen werden bei der genauen Beschreibung dieser Induktionszähler angegeben werden.

Die Wechselstrom-Mehrleitersysteme kommen überwiegend nur als Verkettung phasenverschobener Ströme in Betracht, und auch hier handelt es sich heute in der Hauptsache nur um das gewöhnliche Dreiphasen- oder Drehstromsystem. Die früheren Formen des Zweiphasensystems mit getrennter oder gemeinsamer Rückleitung, spätere Abarten wie das monocyklische System u. a. können heute größtenteils nur noch historisches Interesse in Anspruch nehmen.

26. Dreiphasenzähler.

Bei dem Dreiphasensystem ist bekanntlich je nach Art der Schaltung der Verbrauchsapparate zwischen der Stern- und Dreiecksschaltung zu unterscheiden; dies ist jedoch für die Messung selbst ohne Belang. Die Energie eines Dreiphasensystems ist bekanntlich bei gleicher Belastung $= EI\sqrt{3}$, wobei E die zwischen zwei Phasen herrschende Gesamtspannung, I der in

einer der Phasenleitungen fließende Strom ist. Stellen nun $i_1\, i_2\, i_3$ und $e_1\, e_2\, e_3$ die bezüglichen Stromstärken und Spannungen der drei Leiter eines beliebig belasteten Dreiphasennetzes gegen Erde dar, so ist die in diesem Leitersystem verbrauchte Energie A in jedem Falle

$$A = i_1 e_1 + i_2 e_2 + i_3 e_3.$$

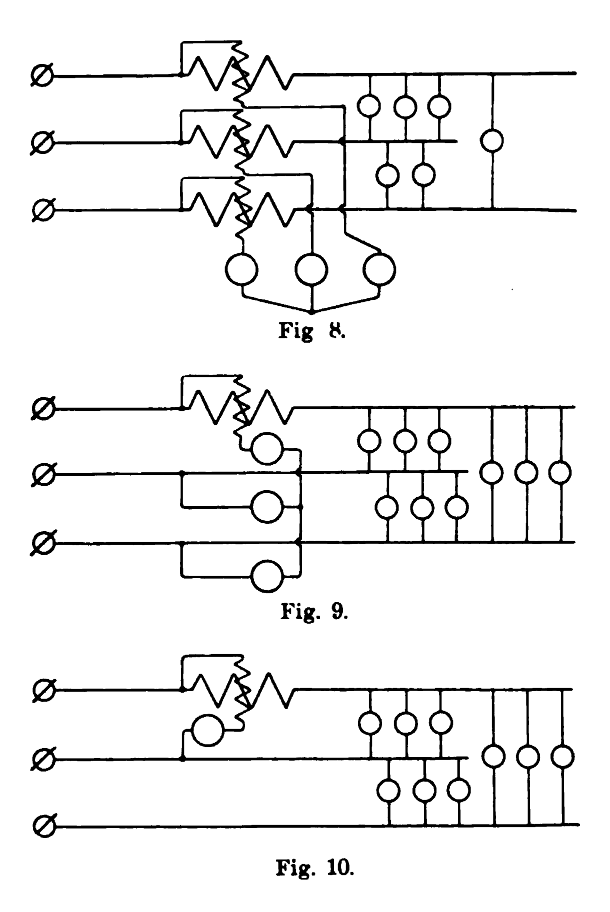


Fig. 8.

Fig. 9.

Fig. 10.

Durch drei Messungen, d. h. entweder durch drei einfache Einphasenzähler oder durch einen aus drei Einzelsystemen bestehenden Zähler, wobei jeder Hauptstrom mit der von ihm abgezweigten Spannung kombiniert ist, s. Fig. 8, wird also die gesamte Energie eines beliebig belasteten Dreiphasensystems gemessen.

Sind nun, wie bei einem Mehrphasenmotor, alle drei Phasen als praktisch gleichmäßig belastet anzusehen, so kann man auch mit der Messung nur einer Phase auskommen, s. Fig. 9. Hierbei muß dafür Sorge getragen werden, daß die von der zu messenden Phase abzweigende Spannungsspule mit dem zu ihr gehörigen Vorschaltwiderstand w_3 zusammen gleich hohen Widerstand erhält wie jeder der beiden anderen Widerstände w_1 und w_2. Es ist also durch diese Widerstandskombination ein künstlicher Nullpunkt geschaffen. Die Spannung jeder Phase, also auch der an dem Meßapparat angeschlossenen, gegen diesen Nullpunkt ist $\frac{E}{\sqrt{3}}$, wenn E die volle Phasenspannung darstellt. Der Apparat mißt also $\frac{I \cdot E}{\sqrt{3}}$ oder die ganze Energie ist gleich $\frac{3 \cdot I \cdot E}{\sqrt{3}} = I \cdot E \cdot \sqrt{3}$.

Die in Fig. 8 dargestellte Dreiphasenmessung für beliebige Belastung wurde dann durch die mehrfach erwähnte Aronsche Zweiwattmeter-Methode (siehe II. 4 in 72) nach Fig. 7 ersetzt, ist also mit der gewöhnlichen Dreileiterschaltung für Gleich- und Wechselstrom identisch. Dies findet seine natürliche Erklärung darin, daß in der allgemeinen Gleichung der Energiemessung eines Dreiphasensystems das Dreileiter-Gleichstrom- und Einphasensystem den Spezialfall der Momentanwerte darstellt, in denen die durch beide Stark-

stromspulen fließenden Ströme gleiche, aber entgegengesetzte Phase aufweisen, wobei jedoch Ströme und Spannungen in ihrer ziffernmäßigen Größe voneinander verschieden sein können. Der an die beiden Spannungssysteme angeschlossene dritte Leiter, Fig. 7, dient in diesem Augenblick nur dem Ausgleich der Belastung in den anderen beiden Phasen. Zu beachten ist, daß, während in der Dreiwattmeter-Schaltung Fig. 8 alle miteinander kombinierten Ströme I und Spannungen $\frac{E}{\sqrt{3}}$ in Phase sind, dies bei der Zweiwattmeter-Methode der Fig. 7 nicht mehr zutrifft. Hier sind zwei Ströme I mit der vollen Phasenspannung E kombiniert, aber nicht in Phase miteinander. Bei gleicher Belastung der Phase mißt natürlich jedes der beiden Systeme die Hälfte der Energie. Man kann daher Motoren und andere gleichbelastete Anschlüsse auch nach der einfachen Methode der Fig. 10 messen. Die Konstante des Zählers ist hierbei zwei, während sie bei der Messung nach der analogen Schaltung der Fig. 9 drei ist.

Die in Fig. 7 dargestellte einfache Aronsche Methode läßt nun gemäß der einfachen Überlegung, daß in einem Dreiphasensystem in jedem Augenblick die Summe aller Ströme wie Spannungen Null ist, die Kombination der verschiedensten Differenz- und Summenströme von Strom und Spannung zu, alles zum gleichen Zweck der Messung der gesamten Energie bei beliebiger Belastung. Diese Abweichungen von den vorstehend angegebenen einfachsten und wichtigsten Meßmethoden werden bei den betreffenden Konstruktionen später näher beschrieben werden.

III.

Die heutigen Ampere- und Wattstundenzähler.

A. Elektrolytische Zähler.

27. Allgemeines.

Es wurde bereits in der Einleitung der beiden aus dem elektrischen Meßprinzip sich ergebenden Hauptvorzüge derselben gedacht, der großen Meßgenauigkeit und nicht zu übertreffenden konstruktiven Einfachheit. Die Theorie des elektrolytischen Zählers ergibt sich einfach aus dem FARADAYschen Grundgesetz der Elektrolyse, nach dem gleiche Ströme in gleichen Zeiten von ein und demselben Stoffe gleiche Mengen abscheiden und zwar bei den verschiedenen Stoffen im Verhältnis ihrer elektrochemischen Äquivalente. Man kann also nach diesem Prinzip mit den verschiedensten Elektrolyten genaue Messungen der Stromstärke und Elektrizitätsmengen anstellen, nachdem heute die elektrischen Äquivalente aller chemischen Elemente mit genügender Genauigkeit bekannt sind. Diese nach der Theorie in jedem Falle gleiche Meßgenauigkeit wird jedoch in Praxis durch das besondere Verhalten der einzelnen Grundstoffe mehr oder minder beeinflußt, und man hat die Benutzung gewisser Elemente als besonders praktisch erkannt, wie die elektrolytische Zersetzung von angesäuertem Wasser, von schwefelsaurer Kupfer-, Zink- oder Silberlösung. Schickt man einen elektrischen Strom durch eine solche Lösung, so wird eine bestimmte Menge des Elektrolyten zersetzt, bei Metallösungen insbesondere an der Kathode eine bestimmte Menge Metall niedergeschlagen. Die Messung der zersetzten Menge des Elektrolyten oder des niedergeschlagenen Metalles ergibt ein direktes Maß für die durchgeflossene Elektrizitätsmenge.

Dieses Meßprinzip birgt einen für Elektrizitätszähler besonders wichtigen Vorteil in sich. Es werden auch die schwächsten Ströme hierbei mathematisch genau registriert. Ein elektrolytischer Zähler besitzt daher auch bei der schwächsten Belastung dieselbe hohe Genauigkeit wie bei Vollbelastung, und ermöglicht daher diese Zählergattung mit einigen wenigen Typen auszukommen, da man z. B. einen Zähler für 10 Ampere auch mit gleicher Genauigkeit für die Messung von $^1/_{10}$ Ampere benutzen kann. Ist doch die Hauptfehlerquelle aller anderen mechanischen Messer, die Reibung, hier völlig ausgeschaltet, die namentlich in den unteren Graden der Belastung so hohe Abweichungen ergibt.

Die aus diesem elektrolytischen Prinzip hervorgehende Entbehrlichkeit aller bewegten und komplizierten Teile, die der Benutzung unterworfen sind und durch die sich noch dazu mit der Zeit ändernde Reibung das Resultat

fehlerhaft beeinflussen, ermöglicht eine derart einfache und billige Konstruktion, welche die Einführung dieser Zählergattung namentlich in kleineren Zentralen und bei Hausanschlüssen mit sehr geringer Lampenzahl vorteilhaft macht. Dies hat sich besonders in England praktisch gezeigt, da dort viele derartige kleine Zentralen mit vielen Anschlüssen geringer Lampenzahl vorhanden sind, bei denen die Betriebsspannung von 200—250 Volt noch außerdem den Anschlußwert einer kleinen Hausinstallation, in Ampere ausgedrückt, stark vermindert. Der billige und wegen Abwesenheit jeder Reibung auch bei der schwächsten Belastung genau messende elektrolytische Zähler stellt hier ein willkommenes Hilfsmittel für die Rentabilität der Zentralen dar, da hier gerade diese geringen aber lange Zeit andauernden Belastungen einen großen Teil der Gesamtjahresbelastung ausmachen. England ist daher, nachdem EDISON in Amerika zuerst den elektrolytischen Zähler angewendet, dann aber aus praktischen Gründen hatte wieder aufgeben müssen, das einzige Land, welches diese Kategorie elektrischer Energiemesser noch herstellt und ausgedehnt in Benutzung genommen hat. Außer England hat sich der elektrolytische Zähler anderswo nur in sehr seltenen Ausnahmen eingeführt und nirgends festen Fuß gefaßt.

Dieser Umstand erfährt seine ungezwungene Erklärung, wenn man auch die allerdings beträchtlichen diesem System anhaftenden Nachteile in Rechnung zieht. Das in bezug auf Genauigkeit und Einfachheit der Konstruktion so vorteilhafte Meßprinzip schließt einmal die Verwendung des Zählers für Wechselstrom völlig aus, und gestattet auch bei Gleichstrom nur die Amperestunden zu messen. Keinerlei Abänderungen irgendwelcher Art ermöglichen es, mehr wie die Amperestundenzahl zu registrieren. In dieser Beschränkung der elektrolytischen Zähler als Amperestundenzähler liegt der größte praktische Nachteil, der, weil prinzipieller Natur, nicht zu beheben ist. Hiermit scheidet der elektrolytische Zähler für die Mehrzahl der praktischen Fälle aus.

Was sodann die große Meßgenauigkeit dieser Apparate anlangt, so ist dieselbe praktisch auch nur bei Einhaltung bestimmter Bedingungen vorhanden, wie man sie wohl im Laboratorium ohne größere Schwierigkeiten schaffen und einhalten kann, nicht aber andauernd im gewöhnlichen praktischen Leben, da sich ein Elektrizitätszähler wohl den Anforderungen des praktischen Betriebes, nicht aber im allgemeinen letzterer denen des Zählers anpassen soll. Um eine genaue Messung zu ermöglichen, müssen chemisch reine Materialien verwendet werden, muß die Konzentration der Lösung und ebenso die Temperatur eine bestimmte sein, darf auch die Strombelastung der Elektroden nicht ein gewisses Maß überschreiten. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, so entstehen die Genauigkeit der Messung arg störende gegenelektromotorische Kräfte, tritt Kristallbildung im Elektrolyten auf, die jede genaue Messung unmöglich macht. Diese Nachteile werden noch bedenklicher, falls man, wie meistens, die Zersetzungszelle im Nebenschluß zu einem festen Widerstand, (Shunt, legt, was aus dem doppelten Grunde geschieht, einmal den Eigenverbrauch des Zählers, dann die Bedienungskosten und Manipulationen zu verringern. Namentlich die periodische Bedienung der meisten Systeme elektrolytischer Elektrizitätszähler stellt einen großen praktischen Nachteil derselben dar.

Zusammenfassend kann daher der elektrolytische Zähler bei dem heutigen Stande der Meßtechnik nur eine beschränkte Bedeutung für sich in Anspruch

nehmen. Außer seiner Beschränkung als Amperestundenzähler haben seine Nachteile, die Bedienung, seine Abhängigkeit von Temperaturschwankungen, und schließlich die Inkonstanz und Unzuverlässigkeit seiner Messungen aus den zeitlichen Änderungen des Elektrolyten hervorgehend, bis heute nicht insgesamt und genügend beseitigt werden können; wenigstens liegen hierüber längere praktische Erfahrungen außer derjenigen der betreffenden Fabrikanten nicht vor.

Praktische Ausführungsformen.

28. Der ältere Edison-Zähler.

Es wurde bereits mehrfach erwähnt, daß der urspüngliche Edison-Zähler, aus amalgamierten Zinkplatten, die in einer neutralen Zinksulphatlösung

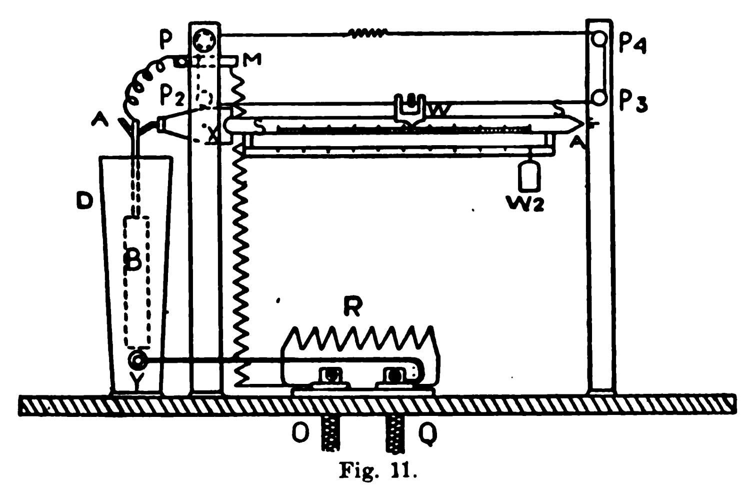


Fig. 11.

stehen, in Verbindung mit einem elektrischen Temperaturregulator bestehend, sich trotz zeitweilig ausgedehnter praktischer Anwendung in Amerika und auch in einigen Fällen in Europa nicht hat den gesteigerten Ansprüchen der modernen Meßtecknik gegenüber halten können. So sehr Edison auch immer wieder auf dies Problem zurückkam, der mechanische Elektrizitätszähler hat auch in Amerika den elektrolytischen fast völlig verdrängt.



Fig. 12.

Aus den vorstehend angegebenen Gründen findet sich der elektrolytische Zähler nur noch in England vor.

29. Long-Schattner-Zähler.

Am meisten dem Edison-Zähler ähnelnd ist der Long-Schattner-

Zähler, der in Fig. 11 und 12 schematisch sowie in einer neueren Ausführungsform abgebildet ist. SCHATTNER benutzt die Erleichterung, die eine die positive Elektrode bildende und in ein mit Kupfersulfatlösung gefülltes kupfernes Anodengefäß eintauchende Kupferplatte bei Durchgang des Stromes erfährt, um einen Wagebalken zum Verlassen der Gleichgewichtsstellung zu bringen. In Fig. 11 ist B die an dem Wagebalken AA hängende Kupferanode, die in das kupferne Kathodengefäß D eintaucht, welch letzteres mit einer schwachsauren Kupfersulfatlösung angefüllt ist. Der um den Punkt X drehbare Wagebalken ist an dem längeren Hebelarme mit zwei parallel und übereinander angebrachten Skalen versehen, über welche die beiden Gewichte W und W_2 durch mechanische Einwirkung von außen verschoben werden können. Das obere Gewicht W insbesondere ist als Gleitstück ausgebildet und wird über die obere Skala vermittels der Schnur P, P_2, P_3, P_4 und eines an dieser Schnur befestigten Knopfes in der Weise fortbewegt, daß es sich frei mit dem Wagebalken bis zum Anschlag nach unten bewegen kann, ohne hierbei durch Schnur und Knopf behindert zu werden. Die Bewegung des größeren Gewichtes W_2 ist durch die in Fig. 12 ersichtliche Anordnung ermöglicht. Der bei O eintretende Strom fließt zum größten Teil durch den Nebenschlußwiderstand R zur Klemme Q, wo er den Apparat verläßt. Der kleinere Zweigstrom geht von O über den hohen Vorschaltwiderstand M und die bewegliche Stromzuführung AP durch das Kupfer-Voltameter und über Y nach Q zurück. Die Wirkung des Apparates erklärt sich hiernach sehr einfach. Nachdem der Apparat zu Beginn seiner Einschaltung abgeglichen ist, d. h. derart, daß sich die Gewichte W und W_2 an dem rechten Ende der Skala befinden, wird durch den elektrischen Strom die Anode B immer leichter und sinkt demzufolge der Wagebalken bis auf den unteren, aus Fig. 12 ersichtlichen Anschlag. Durch Verschieben beider Gewichte wird die Abgleichung wieder hergestellt und aus der veränderten Stellung der Gewichte direkt die durchgeflossene Elektrizitätsmenge berechnet. Die obere Skala S besitzt 100 Teilstriche und ist das Gewicht von W so bemessen, daß jeder Teilstrich einer Einheit entspricht. Die untere Teilung hat nur 10 Abschnitte, deren jeder 100 Einheiten entspricht, indem W_2 das Zehnfache von W wiegt. Sobald soviel Kupfer von B aufgelöst ist, daß sich W und W_2 in ihrer äußersten linken Stellung befinden, was je nach der Type des Apparates nach 1000 oder 2000 Einheiten der Fall ist, je nachdem der Apparat für $2^1/_2$, 5 und 10 Ampere oder 15, 20 und 25 Ampere bestimmt ist, müssen Platte B und Gefäß D erneuert werden. Platte wie Gefäß werden gegen zwei gleichartige ausgetauscht, die von der Gesellschaft in größerer Anzahl auf Lager gehalten werden. Der Verdunstung der Kupfersulfatlösung beugt man durch Aufgießen einer schwachen Schicht von Maschinenöl vor. Die Spannung an den Enden des Nebenschlusses R beträgt bei 100 Volt Netzspannung 0·7 Volt, bei 200 Volt 1·4 Volt bei Vollast.

SCHATTNER hat nach demselben Prinzip auch einen Elektrizitätsautomaten konstruiert.

30. Bastian-Zähler.

Noch einfacher in Konstruktion und Wirkungsweise ist der auf der Zersetzung von Wasser beruhende BASTIAN-Zähler, dessen Gesamtausführung aus Fig. 13 zu ersehen ist. Der neuerdings aus einer Kalilösung (früher angesäuertes Wasser) beruhende Elektrolyt befindet sich teils in dem senkrechten Meßrohr, teils in dem am unteren Ende desselben befindlichen Behälter, in welchen auch die beiden Nickelelektroden (früher Platin) hinein-

ragen. Die Höhe der Flüssigkeitssäule in dem Meßrohr wird an der seitlich davon angebrachten Skala abgelesen, welche direkt in Einheiten der durchgeflossenen Elektrizitätsmenge geeicht ist. Um die Verdunstung des Elektrolyten zu verhindern, ist oben eine Schicht Paraffinöl aufgegossen. Der den Zähler ohne jede Teilung durchfließende Strom bringt durch Zersetzung des Wassers die Flüssigkeitssäule in dem über den ganzen Bereich der Skala gleich großen Durchmesser aufweisenden Meßrohr zum Sinken, wobei die Trennebene zwischen Paraffinöl und Elektrolyten für die genaue Ablesung maßgebend ist. Die Differenz zweier Ablesungen ergibt die in der bestimmten Zeit durchgeströmte Elektrizitätsmenge. Der

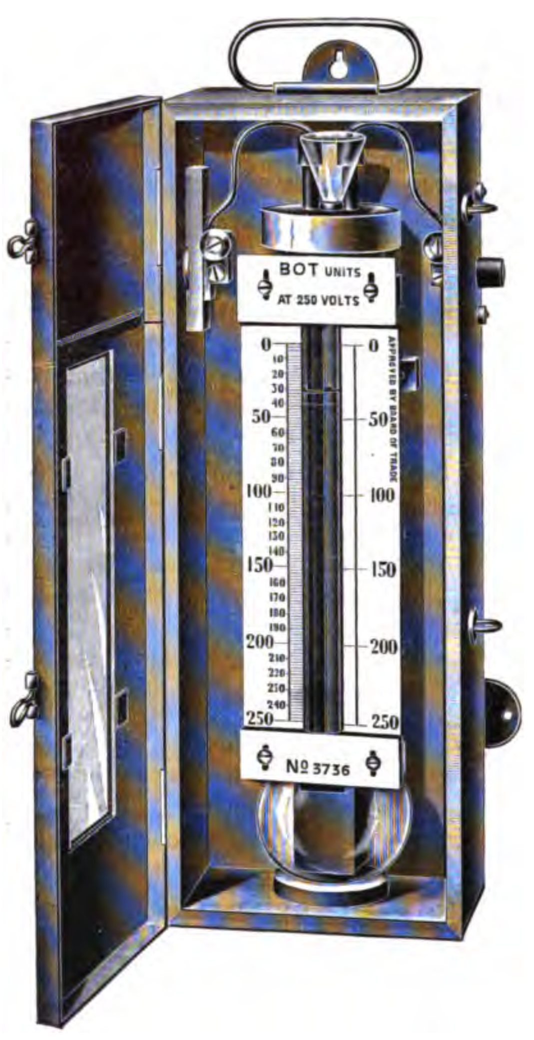


Fig. 13.



Fig. 14. Fig. 15.

Apparat dürfte an Einfachheit kaum zu übertreffen sein und vermeidet ebensowohl alle aus der Nebenschlußschaltung bei Elektrolytzählern sich ergebenden Fehlerquellen, wie alle sonst mit Metallösungen verknüpften Übelstände, wie Kristallbildung etc.

Dagegen ist der Eigenverbrauch des Zählers kein geringfügiger, da die Zersetzung von Wasser ca. 2 Volt beansprucht. Schließlich muß der Apparat häufig bedient werden. Wenn dies auch nur in Neuauffüllen von Wasser besteht, welch letzteres ja ausschließlich nur zersetzt wird, so stellt dies doch bei einer größeren Anzahl von Apparaten eine ziemliche Umständlichkeit

dar, und gibt zu Ungenauigkeiten und Beschädigung der Apparate Veranlassung. Seiner sonstigen Einfachheit und großen Billigkeit wegen ist jedoch der Zähler in einer großen Zahl englischer Zentralen eingeführt.

31. Wright-Zähler.

Um diese Bedienung auf ein Minimum zu reduzieren, hat WRIGHT die fortlaufende Zersetzung des Elektrolyten durch Nutzbarmachung bzw. Wiederauflösung der Zersetzungsprodukte, wie dies schon EDISON bei seinem selbst registrierenden Zinksulfatzähler anstrebte, zum Grundprinzip seiner Konstruktion gemacht. WRIGHT, der weiteren Kreisen durch den nach ihm benannten Maximalstromtarif bekannt wurde, konstruierte zu Anfang dieses Jahrhunderts mit der Firma Reason Manufacturing Co. zu Brighton einen elektrolytischen Zähler, der auf der Zersetzung von Quecksilbernitrat beruht und in den Figuren 14 bis 21, in seiner Gesamtausführung in Fig. 19 und 20 dargestellt ist. Die ihrem Sonderzweck entsprechend gestaltete Zersetzungszelle, s. Fig. 14 und 16, liegt, wie aus dem Schaltungsschema Fig. 17 zu entnehmen ist, in Reihe mit dem hohen Widerstand H an den Klemmen DE des Nebenschlußwiderstandes K an. Die genaue Abgleichung zwischen Shunt und Meßgefäß erfolgt durch Verschieben der Drähte F und G in Rillen der Klemmen D und E. Um den aus den Temperaturschwankungen sich ergebenden Widerstandsänderungen des die Meßzelle enthaltenden Stromkreises entgegenzuwirken, wird ein Teil von H aus Kupferdraht hergestellt, um z. B. mit steigender Temperatur annähernd um ebensoviel den Widerstand anwachsen zu lassen, als er in der Meßzelle geringer wird.

Die Zersetzungszelle selbst enthält in ihrem oberen Teile die aus einer ringförmigen Quecksilberschicht, entsprechend der aus Fig. 16 ersichtlichen Form des Gefäßes gebildete Anode A, während die Kathode aus einer kurzen Platinröhre C von der aus der Figur ersichtlichen Form besteht, die sich unterhalb der Anode A in einer Ausbauchung des aus Glas bestehenden Meßgefäßes befindet. Die Höhe des Quecksilberspiegels der Anode A wird durch das in dem Reservebehälter F enthaltene und mit A kommunizierende Quecksilber konstant erhalten, indem genau ebensoviel Quecksilber, als beim Arbeiten des Zählers von A aufgelöst wird, automatisch von F aus bis zur Erschöpfung des Vorrates nachfließt. Wird nun der Zähler in der richtigen Schaltung der Fig. 17 von Strom durchflossen, so wird an der Kathode C das Quecksilber in feinen Kügelchen abgeschieden. Der Form der Kathode C wegen fallen diese Kügelchen nach unten und werden hier von der nach oben trichterförmig ausgebildeten und bei kleineren Zählern geraden, bei solchen für größere Stromstärken zweifach gebogenen Meßröhre aufgefangen, welch letztere genau kalibriert ist. Den jeweiligen Stand der Quecksilbersäule liest man an der daneben befindlichen Skala direkt in B.O.T.-Einheiten (Board of Trade-Einheiten = Kilowattstunden) ab, und zwar enthält die ganze Skala 100 B.O.T.-Einheiten. Sobald nun bei Zählern für größeren Meßbereich das in den beiden U-förmigen Schenkeln der zweifach gebogenen Meßröhre gleichzeitig aufsteigende Quecksilber die Krümmung zu dem nach unten führenden Schenkel der Meßröhre erreicht, wird die gesamte Quecksilbermenge durch Heberwirkung nach unten abgezogen und fällt in ein unteres, weit geräumigeres Gefäß, welches ebenfalls kalibriert ist; und zwar entspricht eine Teilung dieses größeren Gefäßes der gesamten eine ganze Füllung des zweifach gebogenen Meßrohres ausmachenden Quecksilbermenge. Da letztere 100 B.O.T.-Einheiten gilt, so stellen die 9 Teile der größeren 900 KWSt. dar und kann man daher mit dem Zähler 900 + 100

= 1000 KWSt. messen. Alsdann ist der ganze Quecksilbervorrat von F in die Meßgefäße hinübertransportiert. Die als Elektrolyt dienende Quecksilbernitratlösung dagegen ist an Menge und Zusammensetzung unverändert geblieben, da, wie wir sahen, genau soviel Quecksilber wie auf C niedergeschlagen wird von der Anode A wieder in Lösung übergeführt wird.

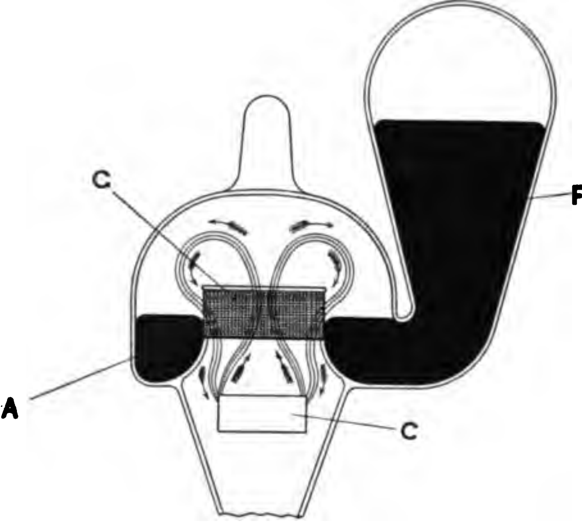


Fig. 16.

Nur in den der Anode und Kathode benachbarten Flüssigkeitsschichten treten Konzentrationsänderungen auf, die sich jedoch nach Angabe der den Zähler fabrizierenden Firma dadurch wieder ausgleichen, daß die infolge ihres größeren spezifischen Gewichtes von der Anode nach unten sinkenden Flüssigkeitsschichten mit den von der Kathode nach oben aufsteigenden spezifisch leichteren einen Wirbel, eine Strömung um die Kathode herum bilden, wie dieselbe in Fig. 16 eingezeichnet ist, welche hierdurch eine Vermischung und dauernden Ausgleich herbeiführt. Hierdurch soll die ja nur auf solche Konzentrationsunterschiede des Elektrolyten zurückzuführende Gegen-E.M.K. auf ein Minimum, ein Tausendstel Volt, zurückgeführt, und irgendwelche störende Kristallbildung selbst bei stärkeren Strömen hintangehalten werden. Der Zähler soll hierdurch den dreifachen Betrag seiner normalen Maximalbelastung eine Stunde lang aushalten können, ehe die Kristallbildung anfängt.

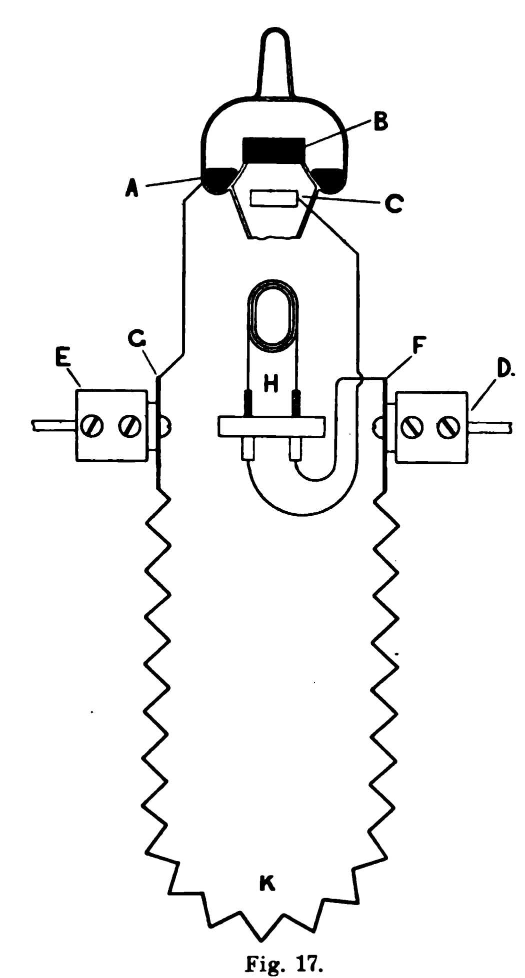


Fig. 17.

Hat nun der Zähler seinen Höchstbetrag, 1000 B.O.T.-Einheiten, wie wir sahen, registriert, unter Überführung des gesamten Quecksilbervorrates von F nach G und S, so macht man den Apparat zur Messung weiterer 1000 B.O.T.-Ein-

heiten in einfacher Weise dadurch fähig, daß man das ganze Glasgefäß, welches nach außen hin hermetisch verschlossen ist, um seine beiden Aufhängungspunkte, ungefähr in Höhe von F, langsam bis in die Stellung von Fig. 18 emporhebt und hierdurch das gesamte Quecksilber aus dem oder den Meßgefäßen wieder in die Vorratskammer F überführt. Diese einfache Manipulation führt den Zähler in seinen Anfangszustand zurück, ohne ihn irgendwie öffnen zu brauchen, Metallplatten wechseln oder den Elektrolyten nachfüllen zu müssen, wie das bei anderen Konstruktionen nötig ist. Diese einfache Methode der Messung sowie der Bedienung des Apparates ist lediglich durch die Doppelnatur des Quecksilbers als Metall und Flüssigkeit möglich.



Fig. 18.

Der Meßapparat wird in einen soliden Metallkasten eingebaut, der in dem vorderen Verschlußdeckel eine Glasscheibe enthält, um den jeweiligen Stand der Quecksilbersäule oder Säulen ohne Öffnung des Gehäuses ablesen zu können, s. Fig. 19 und 20. Außer der größeren Type für 10 Ampere maximal wird die kleinere mit einem einzigen geraden Meßrohr, bis auf den Boden reichend, für $2^1/_2$ bis 5 Ampere ausgeführt, für sehr kleine Hausanschlüsse mit nur wenigen Lampen. Für Dreileiteranlagen kann man sich, außer natürlich zweier getrennter Zähler, noch der Schaltung der Fig. 21 bedienen, um die Messung mit nur einem Zähler genau ausführen zu können. Bei gleichen Nebenschlußwiderständen R_1 und R_2, welche in der angegebenen Weise mit dem neutralen Leiter verbunden sind, mißt der Zähler die Summe der Ströme in C_1 und C_2.

Wenngleich der in dem Wrightschen Zähler enthaltene Elektrolyt, Quecksilbernitratlösung, durch den hermetischen Verschluß der Meßröhre irgendwelchen atmosphärischen Einflüssen und dadurch hervorgerufenen Veränderungen vollkommen entzogen ist, so zeigte sich doch bei längerem

praktischen Betriebe, daß der Elektrolyt sich im Laufe der Zeit durch gegenseitige Einwirkung der in ihm enthaltenen Stoffe, namentlich der freien Säure in seiner Zusammensetzung und seinem Verhalten ändert und zu störender Kristallbildung Veranlassung gab. Diesen Übelstand bemühte sich die herstellende Firma durch Benutzung einer zweiwertigen MERCURI-Verbindung abzuhelfen, die, weil frei von Säure, durch ihren absolut neutralen Zustand allen Veränderungen entzogen ist. Ja, der neue „HARTFIELDsche Patent-Elektrolyt", wie er genannt wird, soll nach den Angaben der Firma



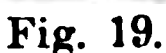


Fig. 19.



Fig. 20.

die weitere wunderbare und praktisch sehr bedeutungsvolle Eigenschaft besitzen, falls der Zähler durch irgendwelche mißbräuchliche Behandlung, Überlastung, Kurzschluß, verkehrte Einschaltung, übermäßige Hitze usw. in seinem normalen Zustand und Verhalten gestört ist, daß der Elektrolyt durch Schütteln und nach Behebung der störenden Ursache von selbst wieder in seinen normalen Zustand zurückgeführt wird. Sobald jedoch solch eine störende Einwirkung stattfindet, so tritt durch im Elektrolyten enthaltenes und hierbei freiwerdendes Jod eine rotbraune Färbung des Elektrolyten auf, was direkt als ein Warnungszeichen zu betrachten ist. Diese durch den neuen Elektrolyten gewährleistete Konstanz in der Wirkungsweise, Zusammensetzung und Widerstand der Zersetzungszelle macht auch eine mehr den modernen Anforderungen an ein elektrisches Meßgefäß entsprechende kon-

struktive Ausführung des ganzen Zählers möglich. Außer dem neuen Elektrolyten, welcher weiterhin den Ersatz der bisherigen Platinkathode *G* durch eine solche aus besonders behandeltem Iridium nötig machte, werden der Nebenschlußwiderstand *K*, der Vorschaltwiderstand *H* und die Anodenkammer *A* neuerdings in verbesserter Form hergestellt.

Zur Ein- und Ausführung seines Maximalstromtarifes hat WRIGHT seinen Maximalstromanzeiger ersonnen, der in Wirkungsweise und Konstruktion mit seinem Zähler verwandte Züge aufweist. Da die genauere Beschreibung desselben gelegentlich der Besprechung der Mehrfachtarifsysteme erfolgt, so sei hier nur bemerkt, daß der WRIGHTsche Höchstverbrauchsmesser einen Differentialthermometer darstellt, bei dem die von einer Stromspule ausgeübte Wärmewirkung das Steigen einer Flüssigkeitssäule in einem Schenkel einer U-förmigen Gasröhre bewirkt. Die in das an passender Stelle dieses Schenkels abgezweigte Meßrohr überfließende Flüssigkeitsmenge stellt ein genaues Maß der maximal verbrauchten Energie dar.

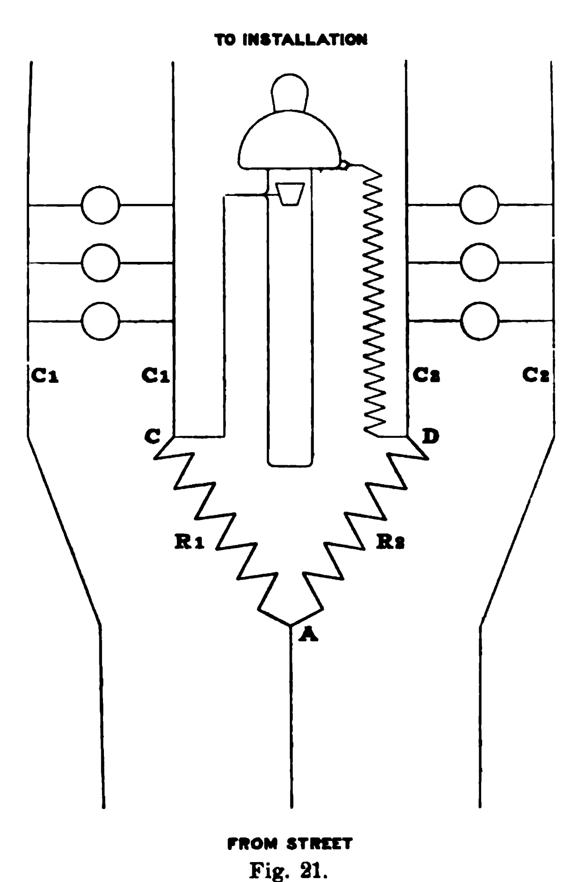


Fig. 21.

Um nun den doppelten Spannungsabfall in dem Nebenschlußwiderstand der Zelle und der Heizspule des Maximal stromanzeiger zu vermeiden, wird letztere als ein Teil des Nebenschlußwiderstandes ausgeführt und benutzt. Beide Instrumente werden dann mechanisch kombiniert. Aus praktischen Rücksichten hat die Firma einer neueren Mitteilung zufolge diese kombinierte Ausführung beider Apparate wieder aufgegeben.

Während der WRIGHTsche Zähler und Tarif in vielen englischen Zentralen in Benutzung steht, auch in Amerika häufig angewendet wird, hat sich dies bisher auf dem Kontinent nur in vereinzelten Fällen ermöglichen lassen.

B. Aus mechanischem Uhrwerk und elektrischem Meßinstrument bestehende Uhr.

32. Aussichtslosigkeit des Prinzipes.

Wie schon in der historischen Übersicht bemerkt wurde, hat dieses Konstruktionsprinzip in der Entwickelung des Elektrizitätszählers eine hervorragende Rolle gespielt, hat sich aber zufolge der ihm grundsätzlich anhaftenden

Kompliziertheit der Konstruktion und Wirkungsweise in Praxis nicht behaupten können, wie dies an dem Beispiel des älteren SIEMENSschen Säbelzählers sowie des neueren Präzisionszählers derselben Firma zu ersehen ist. Die von diesen Apparaten noch vereinzelt benutzten Exemplare werden nicht mehr erneuert, sondern nötigenfalls immer durch Motorzähler ersetzt. Trotz dieses völligen bisherigen Mißerfolges wird jedoch auf dies Grundprinzip immer wieder von verschiedenen Erfindern zurückgegriffen, wie die Patentliteratur bis in die neueste Zeit lehrt. Ein Erfolg dieser Bemühungen ist äußerst problematisch.

C. Pendelelektrizitätszähler.

Der Aronzähler.

33. Theorie des Pendelzählers.

Als alleiniger Vertreter der verschiedenen Zählerkonstruktionen, denen die Beeinflussung eines Uhrpendels zur Grundlage dient, hat sich der von ARON entworfene Pendelelektrizitätszähler erhalten, dessen historische Entwickelung bereits in den wesentlichen Zügen angegeben wurde. Das Prinzip des Apparates beruht auf der elektrischen Beeinflussung eines durch eine mechanische Fremdkraft angetriebenen Uhrpendels. Die Schwingungsdauer eines gewöhnlichen physischen Pendels ist bekanntlich in dem Ausdruck

$$T = \pi \sqrt{\frac{M}{PL}}$$

gegeben, worin M das Trägheitsmoment des Pendels in bezug auf die Drehungsachse, P das Gewicht und L die Länge des physischen Pendels bedeutet. Da diese gesamten Größen, von denen die Schwingungsdauer abhängt, praktisch Konstanten sind, so folgt hieraus die für die gesamte Uhrentechnik so wichtige Tatsache, daß ein einmal in Bewegung gesetztes Pendel unter dem alleinigen Einfluß der Schwerkraft eine Reihe von Schwingungen von stets gleicher Zeitdauer ausführt. Wohl nimmt der Ausschlag, die Amplitude, stetig ab infolge der Lager- und Luftreibung, und wird hierdurch die dem Pendel ursprünglich mitgeteilte Energie allmählich aufgezehrt, die Schwingungsdauer bleibt aber unverändert. Werden in der Zeit t bei derart gleichmäßigem Gang des Pendels n solcher Schwingungen von gleicher Zeitdauer vollführt, so ergibt die mechanische Registrierung dieser Schwingungszahl n

$$n = \frac{t}{T} = \frac{t}{\pi}\sqrt{\frac{PL}{M}}$$

umgekehrt ein Maß der Zeit t. Gibt man nun dem Pendel nach jeder Ganz- oder Halbschwingung durch eine äußere Kraft einen neuen Anstoß, der dem Pendel wieder soviel an mechanischer Energie zuführt, als es an seiner lebendigen Kraft während der vorangegangenen Schwingung durch Reibung verschiedener Art eingebüßt hat, so vollführt das Pendel solange regelmäßige Schwingungen um seine Gleichgewichtslage, bis der in der betreffenden Fremdkraft aufgespeicherte Vorrat an mechanischer Energie aufgezehrt ist. Als solche Fremdkräfte benutzt man bekanntlich die Schwerkraft, wie in

den gewöhnlichen Regulatoruhren durch Niedersinken von Gewichten, die Federkraft zusammengerollter Spiralfedern, wie in den Taschenuhren, Weckeruhren u. dgl., oder auch elektromagnetischen Antrieb, wie dies ARON schließlich ausführte. Läßt man nun außer der Schwerkraft, welche Größe ja in dem Ausdruck P des Gewichtes enthalten ist, noch eine andere Kraft auf das Pendel einwirken, indem man z. B. die für gewöhnlich vorhandene Pendellinse durch einen permanenten Magneten vom magnetischen Moment H ersetzt, und ordnet unterhalb des Magneten, möglichst nahe zu ihm, eine Stromspule an, deren magnetische Achse annähernd mit der Gleichgewichtslage des Pendels zusammenfällt, so wird der gleichmäßige Gang des letzteren durch einen jene Spule durchfließenden Strom offenbar verändert. Ist die Wirkung, von der Stromrichtung bedingt, eine anziehende, so addiert sich dieselbe zu derjenigen der Schwerkraft, die neue Schwingungsdauer T' bei dem Strome I ist

$$T' = \pi \sqrt{\frac{M}{PL + aHJ}},$$

also kleiner, die Schwingungszahl N jedoch

$$N = \frac{t}{\pi} \sqrt{\frac{PL + aHJ}{M}}$$

größer geworden. a ist eine Konstante des Apparates, in der Abstand von Magnet und Spule, Windungszahl usw. ihre Berücksichtigung finden, H das magnetische Moment des Magneten. Der letzte Ausdruck für N ist nun leicht in die übersichtlichere Form zu bringen,

$$N = \frac{t}{\pi} \sqrt{\frac{PL}{M}} \left(1 + \frac{aHJ}{PL}\right)^{\frac{1}{2}},$$

wobei der Ausdruck

$$\frac{t}{\pi} \sqrt{\frac{PL}{M}}$$

einfach die normale Schwingungsdauer des Pendels n ohne Einwirkung des Stromes ist. Setzt man fernerhin

$$\frac{a \cdot H}{PL} = \frac{1}{C},$$

so vereinfacht sich die Gleichung für N weiterhin auf

$$N = n \left(1 + \frac{J}{C}\right)^{\frac{1}{2}},$$

oder in Reihe entwickelt

$$N = n \left(1 + \frac{J}{2C} - \frac{J^2}{8C} + \dots\dots\right).$$

Ist hierbei $\frac{J}{C}$ klein gegen 1, so kann das quadratische Glied außer acht gelassen werden, und für N mit genügender Genauigkeit der Näherungswert

$$N = n \left(1 + \frac{J}{2C}\right)$$

gesetzt werden, woraus sich

$$nJ = 2C(N - n)$$

ergibt.

Die durch den Strom bewirkte Beschleunigung oder Voreilung, in dem Ausdruck $N-n$ gegeben, gibt also bei bekannter Zählerkonstante C ein Maß des Produktes nJ, d. h. der Normalschwingungszahl in die Stromstärke, das ist aber die Strommenge. n bedeutet also nicht die Sekunden, sondern diejenige Schwingungszahl, die der Zähler, unbeeinflußt durch den elektrischen Strom, als reine mechanische Uhr gemacht haben würde.

Um die Differenz $N-n$ zu erhalten, muß daher entweder außer dem elektrisch beeinflußten Pendel noch eine Normaluhr vorhanden sein, wie das in den ersten Konstruktionen von Aron auch der Fall war, oder durch ein Differentialwerk wird der Gangunterschied einer Normaluhr und der elektrisch beeinflußten direkt an einem Zifferblatt ablesbar gemacht, was Aron denn auch sehr bald in seinem Differentialzähler ausführte.

Ebenso gut wie eine Beschleunigung kann auch eine Verlangsamung des registrierenden Uhrwerkes eintreten. Aus praktischen Gründen wendete Aron jedoch in der ersten Zeit ausschließlich die Beschleunigung an.

Die bisher betrachtete Ausführung des elektrischen Teiles, permanenter Magnet von Stromspule beeinflußt, registriert die Amperestunden. Ersetzt man den Magneten durch eine dünndrähtige Spule, die in Hintereinanderschaltung mit einem hohen Widerstand von einem der Netzspannung proportionalen Strom durchflossen wird, so werden auch die Schwankungen dieser Größe berücksichtigt, der Zähler registriert jetzt die Wattstunden, ohne daß sich sonst im Prinzip und der Konstruktion weiter etwas änderte.

Um sich nun über die Meßgenauigkeit des Zählers in dieser Form ein Bild zu machen, muß man auf die genauere Formel für N zurückgehen und hierbei mindestens noch das quadratische Glied berücksichtigen.

$$N = n\left(1 + \frac{J}{2C} - \frac{J^2}{8C} + \ldots\ldots\right).$$

Die Auflösung des Ausdruckes ergibt jetzt für nJ, die wahre Strommenge, im Gegensatz zu der vom Apparat gemessenen

$$nJ = 2C\frac{N-n}{1-\frac{J}{4C}}.$$

Es gibt also die an dem Zähler ablesbare Differenz der Schwingungszahlen kein genaues Maß, da die Konstante nicht mehr $2C$, vielmehr

$$\frac{2C}{1-\frac{J}{4C}}$$

ist, d. h., da sie die zu messende Größe J im Nenner enthält, ist es überhaupt keine Konstante mehr. Die Abweichung der Zählerangaben von dem Sollwert wird um so geringer ausfallen, je größer C wird, da hierdurch der Wert von $\frac{J}{4C}$ immer kleiner wird, somit sich die Größe des Nenners immer mehr der Einheit nähert. Dagegen wird die Abweichung um so fühlbarer, je höher die Stromstärke wird, der Zähler wird also bei stärkerer Belastung zu wenig messen.

Die hierfür wichtigste Größe C bestimmt sich aus der obigen Gleichung ihres reziproken Wertes zu

$$C = \frac{PL}{aH}$$

und läßt sich ziffernmäßig am besten aus der vereinfachten Formel für $NJ = 2C(N - n)$ berechnen.

Um C groß zu machen, wird man PL nach Kräften groß wählen, d. h. lange schwere Pendel verwenden, den magnetischen Einfluß dagegen sehr schwach und der Schwerkraft gegenüber verschwindend annehmen. Dementsprechend besaßen die ersten Ausführungsformen des ARON-Zählers auch lange kräftige Pendel und wiesen auch bei Vollast nur relativ geringe Beschleunigung ihrer Schwingungsdauer auf. Beide Folgeerscheinungen dieses Bestrebens, durch Vergrößerung von C das störende quadratische Glied zu beseitigen, waren in mechanischer Beziehung wenig angenehm. Die langen Pendel machten besondere Sorgfalt bei Versendung und Montage des Zählers notwendig, und schlossen die Möglichkeit, ihn in plombiertem Zustande zu verschicken, aus. Die zu gleichem Zweck vorgesehene geringe Differenz der Schwingungszahlen verringerte von vornherein die Genauigkeit der Ablesung, namentlich bei schwächeren Belastungen, machte den Zähler aber im gleichen Verhältnis sehr empfindlich gegen alle mechanischen Gangfehler beider Uhren, wie sie selbst bei genauester anfänglicher Regulierung mit der Zeit sich unfehlbar einstellen.

34. Umschaltprinzip.

Es gelang dem unablässigen Bemühen ARONS, in seinem neuen Umschaltzähler[1]) neben anderen großen Verbesserungen seines bisherigen Pendelzählers auch die fehlerhafte Einwirkung des quadratischen Gliedes grundsätzlich zu beseitigen, und zwar in ebenso einfacher wie gründlicher Weise, ein Kennzeichen der meisten großen, grundsätzlichen Neuerungen. Statt des einen Pendels setzt ARON nunmehr beide der elektromagnetischen Beeinflussung aus, aber im entgegengesetzten Sinne, so daß jetzt in derselben Zeit t die Schwingungszahlen beider Pendel

$$N_1 = n\left(1 + \frac{J}{2C} - \frac{J^2}{8C}\right) \quad \text{und}$$

$$N_2 = n\left(1 - \frac{J}{2C} - \frac{J^2}{8C}\right)$$

sind. Ihre Differenz

$$N_1 - N_2 = \frac{nJ}{C}$$

ergibt dann das direkte und genaue Maß der verbrauchten Strommenge bzw. Wattstunden, ohne irgendwelche Korrektion, bei jeder Stromstärke. Die Pendel werden aber außerdem in gleichmäßigen Perioden, ungefähr alle 10 Minuten, durch das Uhrwerk elektrisch umgeschaltet, d. h. die Richtung des in den Nebenschlußspulen, den Pendelrollen durchfließenden Stromes wird umgekehrt, so daß in der neuen Schaltperiode das bisher beschleunigte Pendel verzögert wird, umgekehrt das bisher unterhalb seiner Normalschwingungsdauer verlangsamte Pendel übernormal schwingt. Es verschwindet also auch bei jedem einzelnen Pendel für die Dauer einer ganzen Schaltperiode der Einfluß des quadratischen Gliedes. Dies ist von Wichtigkeit für die Mehrleiterzähler, sei es für Gleich- wie Wechselstrom, da hierbei

[1]) s. ETZ. 1897 Heft 26; 1903 Heft 20.

für jeden einzelnen Stromkreis ein Pendel vorhanden ist, welches auch bei alleiniger Belastung des betreffenden Stromkreises korrekt messen soll. Bei dem einfachen Zweileiter-Gleichstrom oder -Wechselstromzähler liegen beide Pendel in dem gleichen Stromkreis, hintereinander geschaltet. Hierdurch wird einmal die Empfindlichkeit verdoppelt, und gleichzeitig bei allen Typen des Zählers eine vollkommene Astasierung gegen äußere magnetische Beeinflussungen, störende Kraftfelder u. dgl. erzielt, da beide Pendelrollen stets gleichartig in den Nebenschluß des Zählers geschaltet sind.

Diese vollkommene Beseitigung des störenden quadratischen Gliedes machte weitere mechanische wie elektrische Verbesserungen des Zählers möglich durch Wahl viel kürzerer und leichterer Pendel, die den Apparat ohne Arretierung plombiert zu versenden gestatten, sowie durch Erhöhung der Schwingungszahlen und Differenzen, die die Empfindlichkeit und Meßgenauigkeit beträchtlich erhöhen.

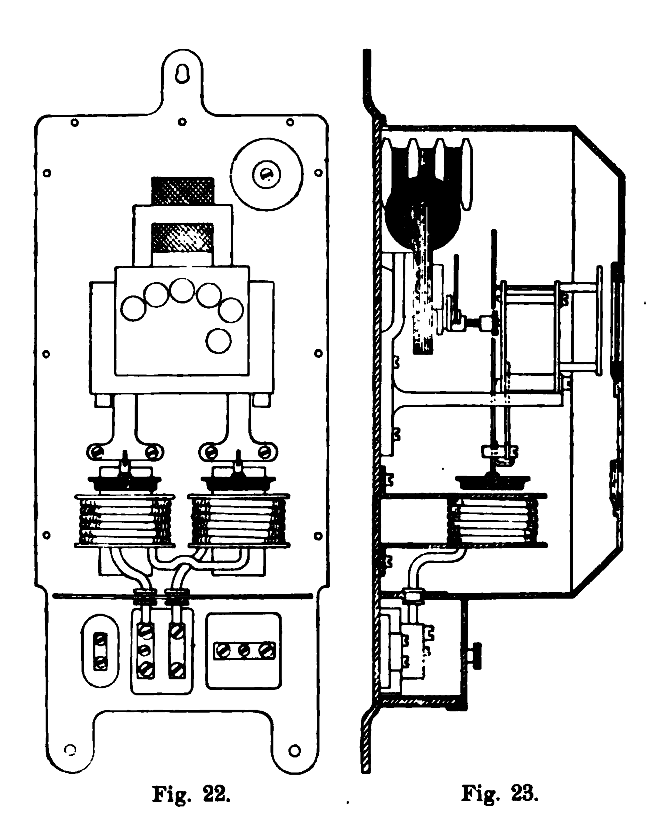


Fig. 22. Fig. 23.

Der von Aron zu dieser Zeit gleichzeitig eingeführte selbsttätige elektrische Aufzug des Zählers tat das übrige, um den Apparat noch von den mechanischen Nachteilen seiner bisher rein uhrenmäßigen Ausführung zu befreien und brachte ihn auf die hohe Stufe der Vollendung, in welcher er jetzt seit ca. 10 Jahren ohne sehr wesentliche Abänderungen gebaut wird.

85. Gesamtkonstruktion und Wirkungsweise. Konstruktion und Wirkungsweise des Zählers, und zwar in seiner einfachsten Form als Zweileiter-Gleichstromzähler, wie derselbe in Fig. 22 und 23 schematisch, in Fig. 33 in praktischer Ausführung in der Gesamtansicht dargestellt ist, und von dem sich die Mehrleiter- und Wechselstrommesser nur in Einzelheiten unterscheiden, sind in großen Zügen folgende:

Der Zähler wird periodisch durch eine an der Rückwand angebrachte elektromagnetische Vorrichtung aufgezogen, die von der Spannung erregt wird. Ein erstes Differentialwerk, dessen Planetenradwelle den mechanischen Antrieb erfährt, treibt gleichmäßig die Steigradwellen der beiden Pendel bzw. Uhrwerke an. Die so mechanisch angetriebenen Pendel, die an ihrem unteren Ende die Spannungsrollen tragen, werden durch die darunter befindlichen Stromspulen in ihrem annähernd gleichmäßigen Gang gestört, so daß das eine Pendel um ebensoviel beschleunigt wird, wie das andere verlang-

samt. Die so durch die Pendel geänderte Umdrehung der Steigräder wird auf ein zweites schwächer gehaltenes Differentialwerk übertragen, dessen Planetenrad daher mit der Differenz der Geschwindigkeit beider Steigräder umläuft und seinerseits das Zeigerwerk antreibt. In bestimmten Zwischenräumen wird nun durch dasselbe Hauptuhrwerk ein Kommutator betätigt, der den Strom in den beiden Pendelspulen umkehrt, wodurch jedesmal der Drehsinn des das Zählwerk antreibenden Planetenrades ein anderer wird. Ohne weiteres Hinzutun würde hierdurch der Zähler bei gleichem Strom ebensoviel rückwärts laufen, wie in der ersten Schaltperiode vorwärts, so daß keine Registrierung erfolgt. Dies zu verhüten, erfolgt die Übertragung der Bewegung der zweiten Planetenradwelle auf das Zählwerk nicht direkt, sondern unter Zwischenschaltung verschiedener Zahnräder, von denen zwei auf einer Wippe befestigt werden, die gleichzeitig mit der Stromumkehr in den Pendelrollen umgelegt wird. Hierdurch bleibt in jedem Falle, mag der Drehsinn der Planetenradwelle sein, welcher er will, die gleiche Drehrichtung des Zählwerkes gewahrt.

Diese mechanische Umkehrung in der Beschleunigung, bzw. Verlangsamung beider Pendel hat aber abgesehen von der Unschädlichmachung des quadratischen Gliedes hinsichtlich der elektrischen Wirkungsweise des Zählers noch den weiteren sehr wohltätigen Erfolg in rein mechanischer Beziehung, daß die Uhrwerke von Anfang an nicht so peinlich genau auf gleichmäßigen Gang einreguliert zu sein brauchen als dies ohne die fortlaufende Umschaltung nötig wäre, und daß geringe mit der Zeit sich einstellende Gangdifferenzen, die den verschiedensten Ursachen entstammen können, wie kleine Gewichts- oder Längenveränderungen der Pendel, Einwirkungen äußerer Magnetfelder, sich für die Dauer einer vollen Schaltperiode ebenfalls gegenseitig aufheben.

Wird daher der betreffenden Leitung, in die der Apparat eingeschaltet ist, kein Strom entnommen, so kann ein Leerlauf des Zählers auch dann nicht eintreten, wenn beide Pendel von Anfang an etwas „verreguliert" sind, d. h. einigermaßen unsynchron schwingen, denn wenn das Zählwerk wirklich während einer halben Schaltperiode um einen geringen Betrag vorgeschoben ist, so wird es doch während der nächsten Periode um genau den gleichen Betrag wieder zurückgebracht. Denn die einmal vorhandene Unregelmäßigkeit, wie von vornherein vorhandene Verregulierung der Pendel oder allmählich hinzugekommene Gangdifferenzen wirken mindestens während zweier aufeinanderfolgenden Schaltperioden genau gleich, heben sich also auf.

Nun gibt es allerdings noch andere störende Ursachen, die periodisch oder auch unregelmäßig auftreten und daher durch die Umschaltvorrichtung nicht mehr ausgeglichen werden können. Diese geben dann zu Leerlauf, dem gefürchteten Nachteil aller Zähler, Veranlassung. Um diesen grundsätzlich auszuschließen, ist neuerdings noch eine Hilfsspule oberhalb einer Pendelspule vorgesehen, die von der Spannung erregt auf die auch bei stromlosem Zustand der Starkstromspulen von dem Spannungsstrom durchflossenen Pendelspulen so einwirkt, daß der Zähler langsam rückwärts zu laufen beginnt. Dieser Rücklauf des Zählers wird im Zählwerk durch eine Sperrvorrichtung gehemmt, so daß sich das Zählwerk nunmehr in einem Zwangszustande befindet, in dem es weder vor- noch rückwärts laufen kann, also vollkommen still steht. Die Größe der Hilfsspule bzw. ihre Einwirkung auf die Pendelrollen muß so bemessen werden, daß einmal die vorbeschriebene

Sperrung des Zählwerkes bei der niedrigsten zulässigen Spannung sicher eintritt, daß aber andererseits auch bei Überspannung durch diese Hilfsspule die Schwingungszahl des Pendels und somit die Genauigkeit des Zählers nicht über einen gewissen Betrag hinaus gestört werden darf.

In dem mechanischen Aufbau des Zählers, der in seinen Einzelheiten in den Fig. 24—29, in der Schaltung für Zweileiter- wie Mehrleitersysteme in den Fig. 30 und 31 wiedergegeben ist, kann man mit Ausnahme des Gehäuses, wie der Anschlußklemmen usw. zwischen 5 wesentlichen Teilen unterscheiden:

1. der elektrischen Aufzugsvorrichtung, Fig. 24 und 25,
2. den beiden Uhrwerken, Fig. 26 und 27,
3. dem Zählerwerke, } Fig. 28 und 29,
4. der Umschaltvorrichtung } Fig. 28 und 29,
5. den Stromspulen, Fig. 22 und 23.

36. Elektrische Aufzugsvorrichtung.

Die Aufzugsvorrichtung, Fig. 24 und 25, wird durch den von der Spule B erregten Elektromagneten E betätigt. Die Wickelung enthält entweder

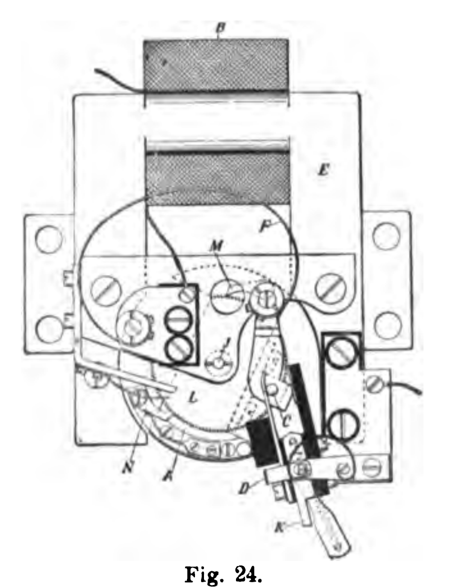


Fig. 24.

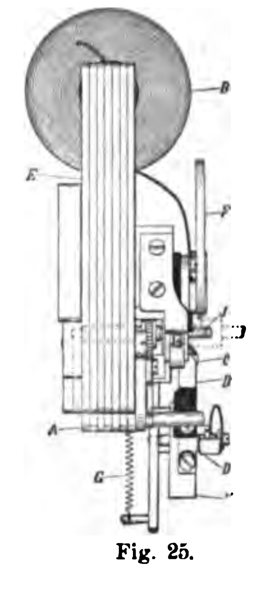


Fig. 25.

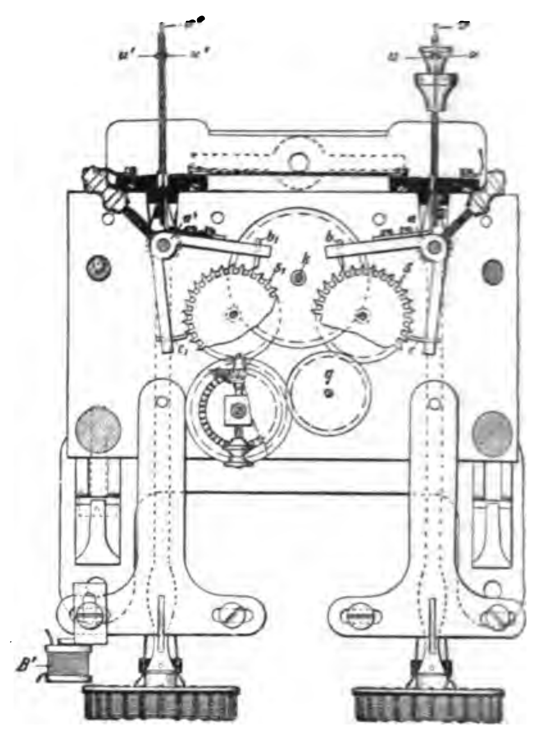
9000 Windungen von 0·13 mm Stärke oder auch 5000 Windungen von 0·115 mm nebst 4000 Windungen von 0·15 mm. Beide Male beträgt der Widerstand insgesamt ca. 1250 Ohm. Bei höheren Spannungen wie 110 Volt kommt ein besonderer Vorschaltwiderstand hinzu, der für je 110 Volt ebenfalls ca. 1250 Ohm beträgt. In dem Felde dieses Elektromagneten ist nun der Z-förmige Anker A auf der Achse J drehbar befestigt, so zwar, daß er sich auf derselben frei drehen kann. Die Achse J ist ihrerseits in einem an der hinteren Seite der Aufzugsvorrichtung angebrachtem Lagerstück drehbar befestigt und treibt mittels eines elastischen Zwischenstückes die Haupttriebwelle des Uhrwerkes an. Auf der Achse J, aber fest mit ihr verbunden, befindet sich das Sperrad L, in welches die beiden Klinken M und N eingreifen, die Klinke M fest am Elektromagneten bzw. einer an ihm angeschraubten Brücke angebracht, die Klinke N dagegen fest mit dem Anker A verbunden. An dem Anker A ist ferner mittelst eines entsprechend gebogenen Verbindungs-

stückes der Kontaktstift C angebracht, der zwischen den beiden Schenkeln der Kippe K spielt. Letztere steht unter dem Zuge der Feder G, welche einmal mit ihrem unteren Ende an einem Verlängerungsstück der rechten Stromzuführung, dann oben beweglich an der Kippe befestigt ist. Der rechte Schenkel der Kippe ist isoliert, der linke steht dagegen durch ein biegsames feines Drahtseil mit der Stromzuführung in Verbindung. Der Anker A, gleich dem Magnetkörper aus mehreren Blechlamellen zusammengesetzt, steht andauernd unter dem Einfluß der Zugfeder F, die einmal fest am Magnetkörper, dann beweglich am Anker A angeordnet ist und ihn stets in die gezeichnete Stellung aus dem Magnetfelde herauszuziehen bestrebt ist.

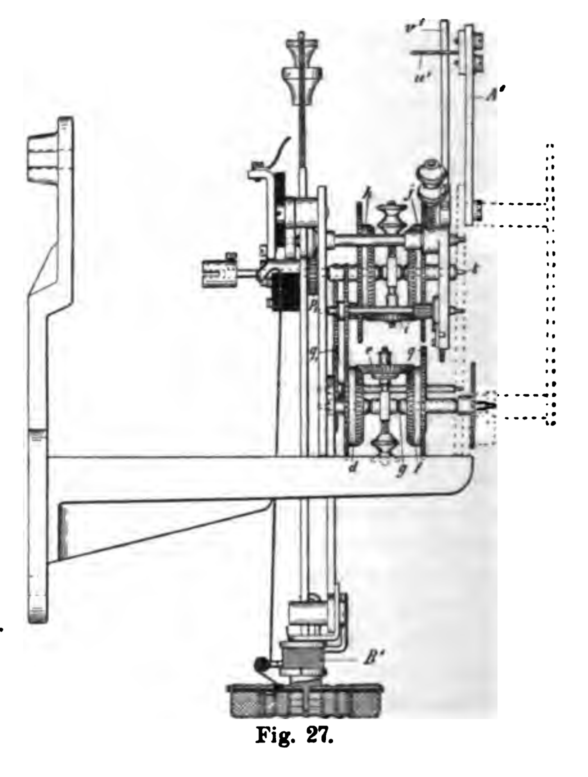
Diese Feder F ist es, welche den mechanischen Antrieb des oder der beiden Uhrwerke bildet und periodisch durch den Elektromagneten E aufgezogen wird. Zu Beginn einer solchen Aufzugbewegung steht der Anker in der gezeichneten Stellung und verläuft der Strom hierbei von der Kippe aus über D-C-F in die Erregerwickelung B und von dort zu der anderen Klemme. Sobald der Elektromagnet erregt wird, zieht er den Anker A annähernd in die Verbindungslinie der Pole und spannt hiermit die Feder F. An dieser Bewegung des Ankers A kann das Sperrad L nicht teilnehmen, da die Klinke M eine Drehung in diesem Sinne hindert. Die andere Klinke N schleift dagegen an der anderen Seite über die Zähne von L hin, bis in der äußersten Stellung des Ankers, d. h. annähernd in der Verbindungslinie der Pole, die Stromunterbrechung erfolgt. Während sich nämlich der Anker, dem magnetischen Zuge folgend, von der in der Zeichnung angegebenen Stellung in jene andere bewegt, drückt der Kontaktstift C, an dem linken leitenden Schenkel der Kippe anliegend, denselben nach unten. Die Kippe nähert sich hierdurch mehr und mehr der Stellung ihres labilen Gleichgewichtes, d. h. in welcher der obere bewegliche Angriffspunkt der Feder G in die Verbindungslinie ihres unteren Befestigungspunktes mit der Drehungsachse der Kippe zu liegen kommt. Der geringste weitere Druck von C in der bisherigen Richtung bringt die Kippe zum Umschlagen, so daß nunmehr der Strom unterbrochen wird, und der Kontaktstift an dem isolierten Schenkel der Kippe zu liegen kommt. Nunmehr sucht der Anker A, dem Zuge der Feder F folgend in seine Anfangsstellung zurückzukehren. Dies kann er auch, jedoch nur in ganz langsamer Bewegung, unter Mitnahme des Rades L und der hiermit fest verbundenen Achse J, da die Klinke N für diese Drehrichtung eine Kuppelung von Anker A und Sperrad L bewirkt. Auf diese Weise wird die Kraft der Feder F auf die Antriebsachse J des Uhrwerkes übertragen. Je mehr sich nun mit dem Ablauf der Pendel der Anker A der gezeichneten Stellung nähert, bringt er durch Andrücken des Kontaktstiftes C gegen den unisolierten Schenkel der Kippe die letztere wiederum in die labile Gleichgewichtslage und darüber hinaus zum Umschlagen. Es erfolgt jetzt erneuter Stromschluß, Betätigung des Elektromagneten, Einziehung des Ankers in die andere Endlage usw.

Zu beachten ist, daß durch diese Kippvorrichtung ein stetes Blankreiben des Kontaktes zwischen Kontaktstift C und leitendem Schenkel der Kippe K bewirkt wird, und daß Stromschluß und Unterbrechung an verschiedenen Punkten erfolgt, was die Betriebssicherheit der Vorrichtung wesentlich erhöht. Neuerdings werden, um das Arbeiten dieser Aufzugsvorrichtung geräuschlos zu machen, die Zinken der Kippe federnd angeordnet, und der federnde Anschlag für den Anker A, in Fig. 24 an der linken Seite unterhalb des fest

angeordneten Endes der Feder F sichtbar, so hoch angebracht, daß bei den im normalen Betriebe vorkommenden Überspannungen ein Anschlagen des Ankers nicht mehr stattfindet. Das hierdurch stark verminderte Geräusch wird durch Anbringung einer Gummilage zwischen Aufzugsvorrichtung und Gehäuserückwand vollends zum Verschwinden gebracht.


Fig. 26.

37. Die beiden Uhrwerke. Die Ankerwelle J treibt durch eine elastische Kuppelung, siehe Fig. 26 und 27, die beiden Uhrwerken gemeinsame Triebwelle k an, die den mechanischen Antrieb durch das Planetenrad i auf die beiden lose auf der Welle k sitzenden Kronräder h und j weitergibt. Letztere setzen die beiden Pendel in Bewegung, und zwar wirkt das hintere Kronrad h auf die Steigradwelle des rechten Pendels, das vordere Kronrad j auf die des linken. Das zu jedem Pendel gehörende Uhrwerk setzt sich aus dem Steigrade s bzw. s_1 und den beiden Ankern a bzw. a_1 zusammen, die mittels der an ihnen befestigten Paletten b c bzw. b_1 c_1 den Pendeln den nötigen Antrieb erteilen. Die Pendel dagegen, je nachdem synchron, über- oder unternormal schwingend, regeln durch ihre Schwingungszahl die Umlaufsgeschwindigkeit der Steigräder s bzw. s_1, welche weiter mit dem zweiten Differentialwert d e f in Verbindung stehen, und zwar das linke Uhrwerk mit dem Kronrade d, das rechte Uhrwerk mit dem Kronrade f, letzteres jedoch unter Zwischenschaltung eines Übertragungsrades q q_1, um die beiden Kronräder d f des zweiten Differentialwerkes zum einander entgegengesetzten Umlauf zu bringen. Das


Fig. 27.

Planetenrad e wird sich daher mit der halben Differenz der Geschwindigkeiten der beiden Kronräder auf dem schneller laufenden abrollen, und kommt daher diese Größe, die ja den Gangunterschied beider Pendel darstellt, in der Umdrehungszahl der das Planetenrad c tragenden Kreuzwelle g zum Ausdruck. Man läßt daher durch diese Kreuzwelle ein Zeigerwerk antreiben und liest an diesem jene Differenz direkt ab (Fig 28 und 29).

38. Die elektrische und mechanische Umschaltung.

Die die elektrische wie mechanische Umschaltung des Zählers bewirkende Umschaltwelle U des Zählers (Fig. 28 und 29) wird von der gemeinsamen Triebwelle k des Zählers mittels der Zahnräder p_1 p_2 p_3, Fig. 27 und 28, angetrieben, so zwar, daß die Welle U samt der mit ihr fest verbundenen Scheibe p_4 in ungefähr 30 Minuten eine ganze Umdrehung macht. An der Scheibe p_4 sind in gleichen Abständen 3 Stifte angebracht, welche den Doppelhebel m n alle 10 Minuten um einen kleinen Betrag anheben. Auf der Welle U sitzt ferner lose die Hülse H, die jedoch durch eine Zugfeder o mit der Scheibe p_4 gekuppelt ist. Drei Stifte, die sich an dem mit der Hülse H verbundenen Zahnrad Z_1 befinden, und gegen die sich der Hebel n legt (Fig. 29), hindern die Hülse H an fortlaufender Drehung. Sobald nun Hebel m je nach 10 Minuten angehoben wird, schnellt auch die Hülse H ein Drittel ihrer Gesamtdrehung nach und wirft dabei durch Eingriff der beiden Zahnräder Z_1 Z_2 die einen Stromwender S tragende Welle V um 180° herum. Die Verbindung der auf diesem Stromwender S schleifenden 4 Bürsten b_1 b_2 b_3 b_4 mit den Pendelrollen und Spannungsklemmen ist aus dem Schema Fig. 30 leicht ersichtlich. Der Vorschaltwiderstand w_2 wird meistens nur bei Zählern für höhere Spannung angewendet. Statt dieser bei Gleich- und Einphasenstrom vorhandenen vier Bürsten sind bei Dreileiter- und Mehrphasen-Stromzählern deren sieben vorhanden, die auf einem Doppelstromwender schleifen. Die hierbei zur Anwendung kommende Schaltung ist in Fig. 31 wiedergegeben.

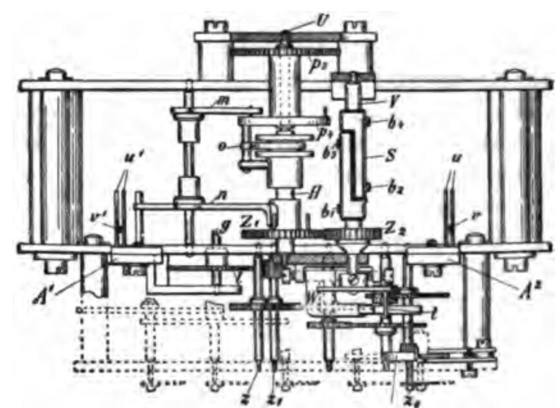


Fig. 28.

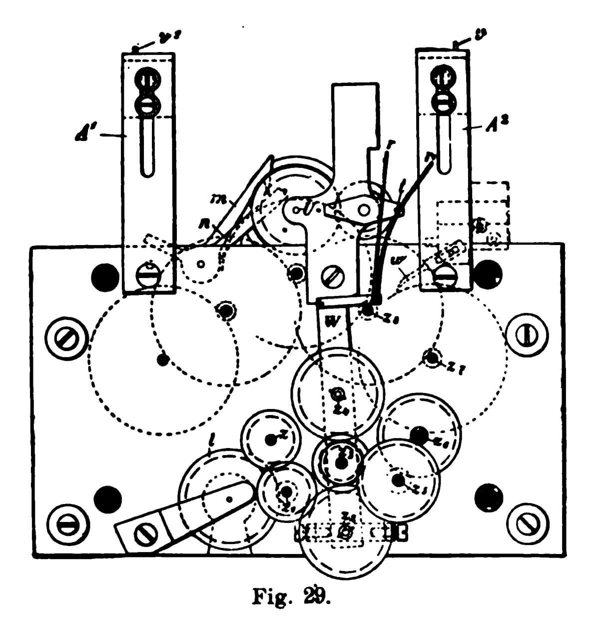


Fig. 29.

An der Welle V ist aber außerdem noch außerhalb der Werkplatte der Exzenterstift t angebracht, der zwischen den beiden Federn r r_1 der Wippe W auf und ab gleitet. Letztere trägt die Räder z_2 z_3 z_4, von denen das mittlere das erste Zifferblattrad antreibt. Wie aus Fig. 29 ersichtlich ist, wird, je nachdem die Wippe W durch den Exzenterstift in Rechts- oder Linksstellung gebracht ist, die Bewegung des auf der Kreuzwelle g sitzenden Zahnrades l entweder durch die Räder z_1 z_2 z_3 oder durch z_1 z z_4 z_3 auf das mittlere Wippenrad übertragen. Auf diese Weise wird gleichzeitig mit dem Stromwechsel auch der Umlaufsinn der Kreuzwelle g für das Zählwerk umgekehrt.

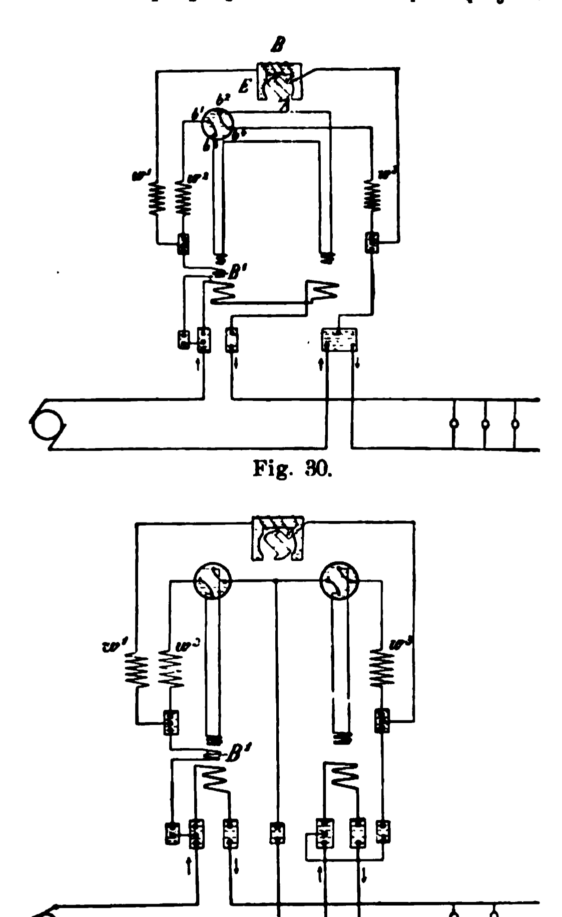


Fig. 30.

Fig. 31.

39. Zählwerk und Stromspulen. Die Übersetzungsverhältnisse von den Steigrädern bis zu dem mittleren Wippenrade z_3 sind so gewählt, daß ein Unterschied von 25 einfachen Schwingungen einem ganzen Umlaufe dieses Rades entspricht. Zwischen letzterem Rade und dem empfindlichsten Zeiger z_6 des Zählwerkes werden dann je nach der Größe des Zählers verschiedene Übersetzungen eingeschaltet, so daß einem ganzen Umlauf dieses empfindlichsten Zeigers zwischen 25 bis 500 Schwingungen entsprechen.

Die verbrauchte elektrische Energie wird direkt in Kilowattstunden abgelesen, wobei die Einheiten, die Kilowattstunden, je nach der Kapazität der Zähler am dritten, zweiten oder ersten Teilkreise abgelesen werden.

Die Pendelspulen sind je nach der Höhe der Betriebsspannung mit 2000 bis 4000 Windungen von 0·06 mm starkem Kupferdraht bewickelt und haben einen Widerstand von 700 bis 1200 Ohm. Ihre Schaltung samt der der Vorschaltwiderstände w_2 und w_3 aus Konstantandraht von 0·10 m Dicke ist aus den Fig. 30 und 31 zu ersehen. Der Gesamtwiderstand des Nebenschlusses schwankt je nach der Höhe der Betriebsspannung zwischen 4000 und 15000 Ohm für je 110 Volt. Der höhere Widerstand wird bei höheren Spannungen gewählt, um so den Gesamtverbrauch des Nebenschlusses innerhalb gewisser Grenzen zu halten. Der Vorschaltwiderstand wird insgesamt unifilar auf Porzellanrollen gewickelt und innerhalb des Zählergehäuses untergebracht.

Die Starkstromspulen weisen für die verschiedenen Stromstärken folgende Abmessungen auf.

3 Amp.	120	Windungen	Kupferdraht	von	1·75 mm
6 „	66	„	„	„	2·00 „
10 „	45	„	„	„	2·75 „
15 „	56	„	„	„	3·00 „
30 „	30	„	„	„	4·00 „
50 „	12	„	„	„	5·50 „
75 „	9	„	„	„	6 bis 7 mm.

Für 100 Amp. und noch höhere Stromstärken kommen 4 bis 1 Windungen aus Façonkupfer zur Anwendung.

Die Zähler sind so konstruiert, daß in stromlosem Zustand jedes Pendel etwa 12000 Schwingungen in der Stunde macht. Es werden nun die Wickelungsverhältnisse so gewählt, daß ein Pendel bei Vollbelastung höchstens um 1800 Schwingungen von seinem normalen Gang abweicht, so daß der Gesamtunterschied beider Pendel höchstens 3600 Schwingungen ausmacht. Indessen wird diese größte Empfindlichkeit nicht überall erreicht, namentlich bei höheren Leistungen nicht, da der Widerstand im Nebenschlußkreis nicht unterhalb 4000 Ohm pro 110 Volt, und der Abstand zwischen Stark- und Schwachstromspulen nicht weniger als 3 mm betragen soll. Durch Verringerung dieses Abstandes könnte zwar die Empfindlichkeit gesteigert werden, man liefe dann aber Gefahr, daß bei Überlastung des Zählers namentlich das jeweilig der Verlangsamung unterworfene Pendel in seinem äußersten Ausschlag durch Abstoßung seitens der Starkstromspule festgehalten würde.

40. Hilfsfedern. Diesen Übelstand hat ARON neuerdings durch Anwendung von Hilfsfedern behoben, siehe Fig. 26 und 27. An jedem Anker a bzw. a_1 ist eine dünne flache Stahlfeder v bzw. v_1 von 0·11 mm Stärke befestigt, die mit ihren freien Enden zwischen den Stiften u bzw. u_1 gleiten. Letztere sind an Metallstücken A bzw. A_1 befestigt, die an der vorderen Werkplatte angeschraubt sind. Hierdurch wird hinsichtlich der Empfindlichkeit ein doppelter Gewinn erzielt. Von vornherein erhöhen diese Federn die Schwingungszahl der Pendel um rund 30 %, so daß also jedes Pendel statt 12000 nunmehr etwa 16000 Schwingungen in der Stunde macht. Die im gleichen Verhältnis erhöhte Differenz der Schwingungszahlen kann aber darüber hinaus noch gesteigert werden, da die vorerwähnte Gefahr, daß das verlangsamte Pendel in einer äußersten Lage festgehalten wird, durch die der abstoßenden Kraft der festen Stromspulen entgegenwirkende der Hilfsfedern stark vermindert wird. Man kann so im Höchstfalle jedes Pendel in der Stunde um 4500 Schwingungen von seinem normalen Gange zur Abweichung bringen, was die Gesamtempfindlichkeit von 9000 Schwingungen ergibt. Dieses Maximum wird allerdings aus den gleichen Gründen, mindestens 4000 Ohm pro 110 Volt Vorschaltwiderstand und nicht weniger als 3 mm Abstand zwischen fester und beweglicher Spule, bei manchen Ausführungen nicht erreicht. Immerhin wird die Empfindlichkeit durch diese Einrichtung der Hilfsfedern allgemein erheblich gesteigert, was namentlich bei den Zählern für hohe Leistung von großer Wichtigkeit ist, indem hierdurch am letzten Ziffernblatte noch Kilowattstunden ablesbar sind, so daß die Zehntel hiervon noch geschätzt werden können.

In mechanischer Beziehung bringen die Hilfsfedern den Vorteil mit sich,

daß die Zähler nicht mehr so überaus empfindlich gegen kleine Abweichungen von der lotrechten Aufhängung sind. Bei den noch zu beschreibenden transportablen Eichzählern werden die Pendel sogar durch Gegengewichte völlig ausgeglichen, so daß ihre Einstellung und damit ihre Schwingungszahl ausschließlich durch die Hilfsfedern bestimmt wird. Diese Zähler sind von der lotrechten Aufstellung völlig unabhängig.

41. Leerlaufverhütung. Aus Fig. 26 und 27 ist die Anordnung der den Leerlauf hindernden Hilfsspule B ersichtlich. Diese Spule, deren Wirksamkeit bereits im vorstehenden erörtert wurde, besteht aus Kupferdraht von 0,1 mm Durchmesser. und zwar enthält sie 500 Windungen von 20 bis 25 Ohm oder 700 Windungen von 30 bis 38 Ohm, je nachdem der Zähler höheren oder niederen Widerstand im Nebenschluß pro 110 Volt enthält. Die Spule soll die Gesamtschwingungszahl des Zählers nur um 2 bis 4 Schwingungen in der Stunde ändern. Die Schaltung ist aus den Fig. 30 und 31 ersichtlich.

Wird der Strom ausgeschaltet, so schwingen die Pendel, deren Antrieb ja durch die Spannung erfolgt, zunächst weiter. Die wenn auch nur schwache magnetische Kraft der Hilfsspule treibt nun den Zähler langsam rückwärts. bis der in das große Zählwerkrad z_7 eingreifende Sperrhaken w (Fig. 29) diesen Rückgang aufhält. Diese Sperrung erfolgt jedoch nicht momentan bei der geringsten Rückwärtsdrehung des Zählwerkes, sondern erst nachdem zwischen beiden Pendeln eine Differenz der Schwingungszahlen von 20 bis 40 Schwingungen eingetreten ist. Zu diesem Zweck ist der Drehzapfen des Sperrhakens in einem Schlitz gelagert, dessen Länge von der Größe des Zählers abhängt. Bei Beginn des Rückwärtslaufes wird daher der Sperrhaken w erst von dem Zählrade z_7 um einen der Länge des Schlitzes entsprechenden Weg zurückgetrieben.

42. Verschiedene Schaltung und Stromarten. Die verschiedenartige Schaltung der Zwei- und Dreileiterzähler geht aus dem beiderseitigen Schaltungsschema, Fig. 30 und 31, hervor. Zu beachten ist für die Schaltung der Pendelspulen bei den Dreileiterzählern, daß der Nebenschluß auch ohne Verbindung mit dem Mittelleiter einfach mit den Außenleitern verbunden werden kann. Dies setzt jedoch einmal voraus, daß sich die Spannung stets annähernd gleichmäßig in beiden Zweigen ändert; sodann muß weiter darauf geachtet werden, daß in diesem Falle zwischen der Stromquelle und dem Zähler keine unplombierte Schalttafel oder Sicherung liegt, die eine einpolige Ausschaltung erlaubt, weil in diesem Falle dem nicht ausgeschalteten Zweige Arbeit entnommen werden kann, die von dem Zähler gar nicht oder nur zur Hälfte registriert wird, je nach dem in dem unterbrochenen Zweige Lampen eingeschaltet sind oder die Verbindung des abgeschalteten Außenleiters mit dem Mittelleiter ganz unterbrochen ist.

Wenngleich der Aron-Zähler als reines Wattmeter theoretisch ebenso gut für Gleich- wie Wechselstrom verwendbar ist, so machen doch in letzterem Falle die Induktionserscheinungen des Wechselstromes gewisse Abänderungen in der Bemessung der Windungszahlen nötig.

Damit der Zähler als reines eisenloses Wattmetter mit Berücksichtigung der Phasenverschiebung die Wechselstromenergie genügend genau mißt, muß auch hier der Widerstand der Spannungsspule, d. h. also der Pendelrollen. dem Gesamtwiderstande des Nebenschlußkreises gegenüber möglichst gering sein. Die Pendel der Wechselstromzähler besitzen daher nur durchgängig 2500 Windungen eines Kupferdrahtes von gleicher Dicke, nämlich 0,06 mm. Der übrige Vorschaltwiderstand ist natürlich bifilar gewickelt und wird durch

beide Umstände erzielt, daß die Verschiebung der Spannungsphase durch die Selbstinduktion der Pendelrollen nur verschwindend klein ist, so daß der Zähler als reines Wattmeter auch die in Praxis durch Motoren und leerlaufende Transformatoren vorkommende Phasenverschiebung mit praktisch genügender Genauigkeit mißt. In den Starkstromrollen werden einmal bei niederen und mittleren Stromstärken die aus Blech gefertigten Wickelungsträger geschlitzt, da dieselben sonst wie eine kurzgeschlossene Sekundärwickelung eines Transformators wirken und das Hauptstromfeld vermindern und in der Phase verschieben würden. Aus dem gleichen Grunde wird bei Messung sehr starker Ströme durch entsprechende Bohrungen und Schnitte in den starken Windungen aus Façonkupfer dafür Sorge getragen, daß die in denselben immerhin noch entstehenden Wirbelströme keinen wesentlichen Einfluß auf die Messung ausüben können.

Der Aufzugsmagnet muß insonderheit bei Erregung durch Wechselstrom anders gewickelt werden. Bei 110 Volt und 50 Perioden erhält er 1650 Windungen von 0,3 mm Durchmesser (gegen 9000 bei Gleichstrom), bei 220 Volt und derselben Periodenzahl etwa 3000 Windungen bei 0,2 mm Durchmesser. Für noch höhere Spannungen kommt bifilarer Vorschaltwiderstand zur Anwendung.

Mit diesen Abänderungen ist der Zweileiter-Wechselstromzähler mit demjenigen für Gleichstrom völlig identisch.

Für Dreileiter-Einphasenstrom, für Zweiphasen- wie Dreiphasenmessung bei beliebig belasteten Zweigen kommt die Dreileiterschaltung gemäß Fig. 31 zur Anwendung, die, was ein Vergleich ohne Mühe erkennen läßt, im Prinzip mit der einfachen Dreileiterschaltung der Fig. 7 identisch ist. Natürlich sind die Konstanten bei den verschiedenen Stromsystemen nicht dieselben. Dieselbe Konstante ist vorhanden bei Dreileiter-, Gleich- und einfachem Wechselstrom, sofern man wenigstens die in beiden Fällen geänderte Windungszahl außer Betracht läßt. Anders ist jedoch die Konstante bei Messung von Zweiphasen- sowie Dreiphasenstrom.

Der praktisch interessanteste Fall ist die Messung der Energie eines beliebig belasteten Drehstromnetzes. Nachdem von Frölich und Görges die ersten Formeln für die Ausführung dieser Messung angegeben waren, baute Aron mit Benutzung dieser ersten Dreiwattmeter-Methode in einer kleinen Abänderung den ersten Drehstromzähler mit drei an einem Pendel übereinanderhängenden Voltrollen, deren jede in 2 Ampererollen schwang. Die Schaltung war hierbei so getroffen, daß die Differenz zweier Starkströme mit der zwischen ihnen herrschenden Spannung elektrodynamisch kombiniert war. Das Umständliche dieser Anordnung wurde von Aron wohl erkannt und zeitigte bald als Resultat seiner Bemühungen die Auffindung und Anwendung der nach ihm benannten und bereits im Vorstehenden und a. a. O. erwähnten Zweiwattmeter-Methode. Die Ableitung derselben ist bereits Bd. II, 2 Nr. 72 gegeben, auch sehe man hierzu Arons eigene Abhandlung (ETZ. 1892, Heft 15). Über die verschiedenen Abänderungen dieser Formel und Schaltung sehe man das spätere Kapitel der Induktionsmotorzähler.

48. Drehstrom-Vierleiter-zähler.

Die Allgemeingültigkeit dieser Zweiwattmeter-Methode ist darauf begründet, daß die Summe der Dreiphasenströme in jedem Augenblick Null ist. Diese Bedingung ist wohl bei der einfachen Dreiecks- und Sternschaltung erfüllt, aber nicht mehr, sobald von dem in dem betreffenden Verbrauchsapparat vorhandenen oder in ihm künstlich geschaffenen Null-

punkt eine neutrale vierte Leitung zur Zentralstation, die in diesem Falle Sternschaltung aufweisen muß, zurückführt. Die in diesem Leiter verlaufenden Ausgleichsströme werden bei der Zweiwattmeter-Methode offenkundig nicht berücksichtigt, und ist daher ein so geschalteter Zähler nicht mehr zur genauen Messung eines solchen Dreiphasen-Vierleitersystems fähig. Als zu Beginn dieses Jahrhunderts mehrere solcher Zentralen gebaut wurden, kam Aron dem hierdurch entstandenen Bedürfnis durch den Bau von besonderen Drehstromzählern für Dreiphasennetze mit vier Leitungen nach.

Man wird die Energie eines solchen Dreiphasennetzes mit neutraler Ausgleichsleitung zweifellos genau messen, wenn man nach der ursprünglichen Dreiwattmeter-Methode jede Phase elektrodynamisch mit der Spannung zwischen derselben und dem Nullpunkt kombiniert. Wie aus der betreffenden Abhandlung von Aron über diesen Gegenstand des näheren entnommen werden kann (ETZ. 1901 Heft 10) ist also die Gesamtenergie

$$W = Ae_1 + Be_2 + Ce_3,$$

wobei $A\,B\,C$ die Phasenströme, $e_1\,e_2\,e_3$ die bezüglichen Spannungen dieser Phasen gegen Null sind. Durch einfachen Ersatz einer dieser Spannungen durch die beiden anderen, z. B.

$$e_3 = -(e_1 + e_2)$$

läßt sich die obige Formel auf den Ausdruck

$$\begin{aligned} W &= (A - C)\,e_1 + (B - C)\,e_2 \\ &= Ae_1 + Be_2 - C\,(e_1 + e_2) \end{aligned}$$

bringen, der, wie ersichtlich, nur die beiden Spannungen $e_1\,e_2$ enthält. Diese Formel läßt sich zur Konstruktion eines Zählers verwenden, der gemäß dem Schema Fig. 32 Strom B mit Spannung e_2 und Strom A mit Spannung e_1 einfach kombiniert, dagegen den gemäß der letzten Formel für W umgekehrt geschalteten dritten Leiter C auf beide Spannungen e_1 und e_2 einwirken läßt.

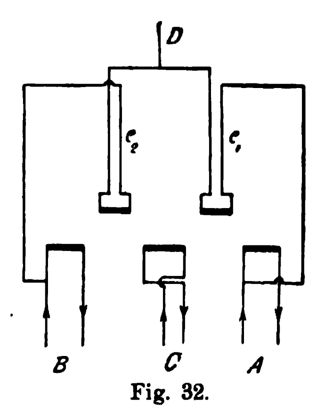


Fig. 32.

Aus praktischen konstruktiven Rücksichten wird es jedoch manchmal schwer sein, die Starkstromspulen so anzuordnen, daß ihre Einwirkung auf die beiden Pendel vollständig gleichwertig ist. Man ordnet in diesem Falle statt des mittleren Leiters C in gleicher Entfernung wie die beiden äußeren Stromrollen den vierten neutralen Leiter in etwas größerer Entfernung so an, daß seine Einwirkung nur ein Drittel derjenigen der beiden anderen Leiter ist. Die Grundlage dieser abgeänderten Schaltung, die auch der praktischen Ausführung dieser Zähler zugrunde liegt, ist die von Aron in der gleichen Abhandlung entwickelte Formel

$$W = A\,E_2 - B\,E_1 - \frac{D}{3}\,(E_1 - E_2).$$

Hierbei sind jedoch die vollen Phasenspannungen E_1 und E_2, d. h. die zwischen den einzelnen Phasen herrschenden Netzspannungen in die Messung eingeführt. Man sieht fernerhin, daß die ersten beiden Größen des rechten Gliedes identisch sind mit denjenigen der reinen Zweiwattmeter-Methode.

Das dritte Subtraktionsglied stellt also die durch die Einwirkung des neutralen Leiters bewirkte Korrektion dar, die an dem Ergebnis der reinen Zweiwattmeter-Messung angebracht werden muß, um die durch die vierte Leitung bewirkte Störung in den Verhältnissen des einfachen Dreiphasensystems zu berücksichtigen. Für die vollständige Genauigkeit dieser Messung ist allerdings, wie ORLICH, ETZ. 1907, S. 71 nachgewiesen hat, die praktisch nicht immer zutreffende Annahme Voraussetzung, daß die Summe der 3 Phasenspannungen immer gleich Null ist.

44. Der normale Umschaltzähler.

Nachdem im Vorstehenden die Normalausführung des ARON-Zählers für Gleich- und Wechselstrom, welche in definitiver Ausführung eines solchen Apparates mit abgehobener Schutzkappe in Fig. 33 abgebildet ist, im einzelnen beschrieben ist, dürfte es zweckmäßig sein, die hieraus sich ergebenden wichtigsten Eigenschaften dieses Apparates kurz hervorzuheben. Die Genauigkeit des Zählers wird von der ausführenden Firma bei Neulieferung auf $\pm 2\,\%$ angegeben, während für die Nacheichung $\pm 3\,\%$ beansprucht werden. Von besonderer Wichtigkeit ist es, daß diese Genauigkeit über den ganzen Meßbereich des Zählers dieselbe ist, daß also der schlimmste Nachteil der anderen Zähler, insonderheit, wie im folgenden gezeigt wird, der Motorzähler, daß die Genauigkeit eines bei halber bis ganzer Belastung sehr gut messenden Zählers bei sehr schwachen Belastungen sich unverhältnismäßig verschlechtert, bei den Pendelzählern nicht vorhanden ist. Der Grund hierfür liegt in dem fundamentalen Meßprinzip, die reibungslose Beeinflussung der Schwingungsdauer eines oder zweier Pendel zur Messung der durchgeflossenen Strommenge oder Arbeit zu benutzen. Wohl ist in dem Apparat wie in jedem anderen mechanischen Triebwerk von Anfang an eine bestimmte Reibung vorhanden, die mit der Zeit zunimmt. Diese Reibung bleibt aber ohne jeden Einfluß auf das Meßresultat. Denn für die Genauigkeit und Unveränderlichkeit der Messung ist lediglich Hauptbedingung, daß die Schwingungsdauer der Pendel die gleiche bleibt. Letztere hängt aber in keiner Weise von den Reibungsverhältnissen im Apparat ab, bleibt vielmehr so lange konstant, als sich die Gewichts- und Längenverhältnisse der Pendel nicht ändern; dies ist natürlich praktisch ohne weiteres anzunehmen. Wird daher dafür gesorgt, daß die Pendel in regelmäßigen Zwischenräumen den zur andauernden Bewegung derselben erforderlichen mechanischen Antrieb erhalten, so schwingen sie mit stets gleicher Schwingungszahl in der Zeiteinheit. Wächst daher die Reibung in dem Apparate, so ändert sich die Schwingungsdauer der Pendel in keiner Weise, nur die denselben mitgeteilte mechanische Energie wird schneller verbraucht und muß öfter erneuert werden. Da sich nun der Zähler mittels der vorhandenen Netzspannung

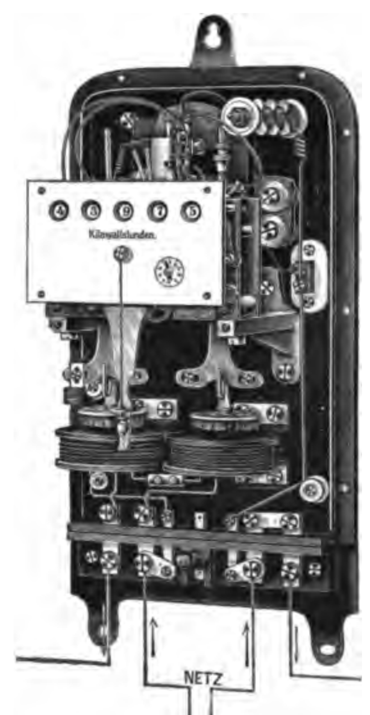


Fig. 33.

selbsttätig aufzieht, sobald die Aufzugsfeder abgelaufen ist, so ist einmal für dauernde Inganghaltung des Zählers gesorgt und sein regelmäßiges Arbeiten sowie seine Meßgenauigkeit ist vollständig dem Einfluß der Reibung oder Änderung derselben entrückt. Infolge dieser ihm innewohnenden hohen Meßgenauigkeit sowie der Konstanz seiner Angaben wurde der Aron-Zähler in seiner Ausführung für Gleich- und Wechselstrom als die ersten beiden Systeme zur amtlichen Beglaubigung durch die deutschen Prüfämter gemäß dem Reichsgesetz über die elektrischen Maßeinheiten zugelassen. Von besonderem praktischen Wert ist die aus dieser Unabhängigkeit der Meßgenauigkeit von der Reibung hervorgehende Tatsache, daß die Konstante eines solchen Pendelzählers so lange unveränderlich ist, als eben Gewicht und Länge der Pendel keine Änderung erfahren. Da letztere wohl praktisch als völlig konstant anzusehen sind, so ist auch die Konstante des Zählers unveränderlich.

Diese hohe Genauigkeit ist jedoch, wie dies schon aus der Unabhängigkeit der Angaben des Zählers von der Reibung hervorgeht, nicht etwa auf Kosten eines hohen Stromverbrauches erzielt worden, vielmehr weist der Zähler auch nach dieser Richtung sehr günstige Verhältnisse auf. Der Stromverbrauch in den Spannungsspulen beträgt in den gängigen Typen 1·2 bis 1·5 und im Maximum ca. 2 Watt pro 110 Volt. Die Starkstromspulen drücken infolge reichlicher Dimensionierung den in ihnen auftretenden Stromverlust ebenfalls auf ein Minimum herab.

In mechanischer Beziehung hat die neuere Ausführungsform durch Anwendung der kleinen Pendel den älteren Typen gegenüber mit ihren langen schweren Pendeln bedeutend gewonnen. Die Zähler können jetzt nach erfolgter Eichung ohne Arretierung und mit Plombe versehen versandt werden, ein für solch diffizilen Apparat nicht hoch genug einzuschätzender Vorteil, da auch die einfachsten sonst bei Montage vorzunehmenden Handgriffe so leicht zu Störungen Veranlassung geben.

Die Leichtigkeit und Kürze der Pendel ermöglicht es, daß dieselben ohne äußeren Anstoß von selbst zu schwingen anfangen, sobald die Spannung 80 % ihres normalen Wertes beträgt. Größere Schwankungen brauchen nicht berücksichtigt zu werden. Der selbsttätige elektrische Aufzug des Uhrwerkes macht jede weitere Bedienung des Zählers überflüssig, eine Bedingung, die jetzt jeder moderne Zähler zu erfüllen hat.

Was die mechanische Ausführung des Apparates anlangt, so ist man neuerdings von der Verwendung der großen schweren Holzkästen, deren Unterbringung bei den Konsumenten mitunter nicht unerhebliche Schwierigkeiten verursachte, abgegangen und hat, wie aus Fig. 22 und 23 zu ersehen ist, an ihre Stelle wie allgemein üblich kleinere leichte Metallkappen treten lassen. In den letzten Jahren hat Aron weiterhin dem modernen auf immer größere Bequemlichkeit gerichteten Bestreben hinsichtlich der Ablesung des Zählers dadurch Rechnung getragen, daß er das bisherige Zifferblatt mit schleichenden Zahlen durch ein solches mit springenden ersetzt hat. Dieses ihm gesetzlich geschützte Zählwerk, vermeidet den Hauptnachteil dieser Apparate, daß bei gleichzeitiger Umschaltung verschiedener Zahlenreihen die hierdurch bedingte momentane Mehrarbeit den Zähler zum Stehen bringen kann.

45. Hauptstrom-Wattstundenzähler.

Wie überall, wird auch bei dem Aron-Zähler eine konstruktiv von der normalen Ausführung abweichende erforderlich, falls es sich um die Messung

sehr hoher Stromstärken handelt, da das bei Wechselstrom vorhandene Hilfsmittel der Reduzierung sehr hoher Stromstärken durch Meßtransformatoren bei Gleichstrom unanwendbar ist. Hier gibt es nur die beiden Möglichkeiten, entweder den Starkstrom direkt durch den Apparat zu führen, oder in die Starkstromleitung einen Nebenschlußwiderstand einzuschalten, und von diesem aus mittels biegsamer Zuleitungsschnüre einen kleinen Teilstrom durch den Apparat zu leiten. Beide Methoden, deren jede ihre besonderen Vor- und Nachteile besitzt, sind von Aron für diesen Zweck angewandt.

Fig. 34 zeigt den Hauptstrom-Wattstundenzähler für 10 000 Ampere. Dieser Apparat kann nur da Anwendung finden, wo durch örtliche und andere Verhältnisse ermöglicht wird, den Zähler senkrecht und zugänglich in die Starkstromleitungen einzuschalten.



Fig. 34.

46. Nebenschluß-Wattstundenzähler.

Für jene anderen Fälle, wo diese direkte Einschaltung des Zählers in die starke Kabelleitung unzweckmäßig oder untunlich ist, kommt der in Fig. 35 dargestellte Nebenschluß-Wattstundenzähler für ebenfalls 10 000 Amp. in Frage. Bei diesem Apparat haben die Pendelrollen wohl ihre normale äußere Form, führen jedoch nicht den Spannungsstrom, sondern den vom Nebenschluß abgezweigten Teil des Starkstromes. Anstelle der sonst unterhalb der Pendelrollen festangeordneten Starkstromspulen sind hier auf Eisenkernen gewickelt zwei mit vielen Windungen versehene und von der Spannung erregte dünndrähtige Spulen angebracht. Es wird dementsprechend auch nicht der die Pendelspulen durchfließende Teilstrom, sondern ebenfalls der die festen Spannungsspulen durchfließende Strom durch die Umschaltvorrichtung des Zählers umgekehrt, und werden hierdurch die Hysteresisfehler praktisch zum Verschwinden gebracht. Der Grund für diese Vertauschung in der Rolle von Haupt- und Spannungsstrom liegt darin, daß man mit einem möglichst schwachen Teilstrom auskommen will, um hierdurch die Größe des Nebenschlußwiderstandes und damit des in ihm auftretenden Energieverlustes nach Möglichkeit zu vermindern. Um daher ohne wesentliche Verringerung der Empfindlichkeit mit einem sehr schwachen Teilstrom in den Pendelrollen auskommen zu können, ist sogar aus ähnlichen Überlegungen, wie man dies auch bei anderen Zählertypen im Spannungssystem tut (siehe hierzu die Bemerkungen der Einleitung Nr. 13), zur Verstärkung des Spannungsfeldes Eisen herangezogen. Man hat so den Spannungsabfall im Nebenschluß auf 0·2 Volt herabdrücken können, ohne im Spannungsfeld

auf einen höheren Eigenverbrauch als 1·2 bis 1·5 pro 110 Volt gehen zu müssen.

47. Transportabler Eichzähler. Den Gegensatz zu diesen ausschließlich für stationäre Anordnung bestimmten Ausführungen bilden die von demselben Konstrukteur gebauten transportablen Eichzähler. Um die Zähler der Konsumenten einer leichten periodischen Kontrolle bzw. Nacheichung unterwerfen zu können, hat Aron in seinem transportablen Eichzähler eine Ausführung des von ihm angewandten Meßprinzipes geschaffen. die in gleicher Weise wie dies bei den elektrischen Präzisionsinstrumenten für transportable Zwecke der Fall ist, von der genauen wagerechten Aufstellung unabhängig ist. Dies ist, wie bereits erwähnt, durch Anwendung von Hilfsfedern und Gegengewichten erreicht, wodurch die Pendel dem Einfluß der Schwerkraft entzogen und lediglich der Richtkraft der Hilfsfedern unterworfen sind. Fig. 36 zeigt diesen Eichzähler in geöffnetem Zustande. Man sieht wie die Verbindung mit den Stromleitungen durch Steckkontakte leicht hergestellt werden kann. und wie der Zähler nach Gebrauch in seinem Eichenholzgehäuse an dem daran befestigten Traggriff wie ein kleiner Koffer bequem transportiert werden kann. Die übrigen Verhältnisse hinsichtlich Strom- und Windungszahlen, elektrischer Aufzugsvorrichtung usw. sind die gleichen wie bei der normalen Ausführung. Größte Sorgfalt ist natürlich auf hohe Meßgenauigkeit gelegt und beträgt die von der Firma garantierte über den ganzen Meßbereich $\pm$ 2 %. Diese Zähler werden auch als Nebenschlußzähler ausgeführt und können dann vermittels verschieden großer tragbarer Nebenschluß-Widerstände für beliebige Stromstärken benutzt werden. Für Wechsel- und

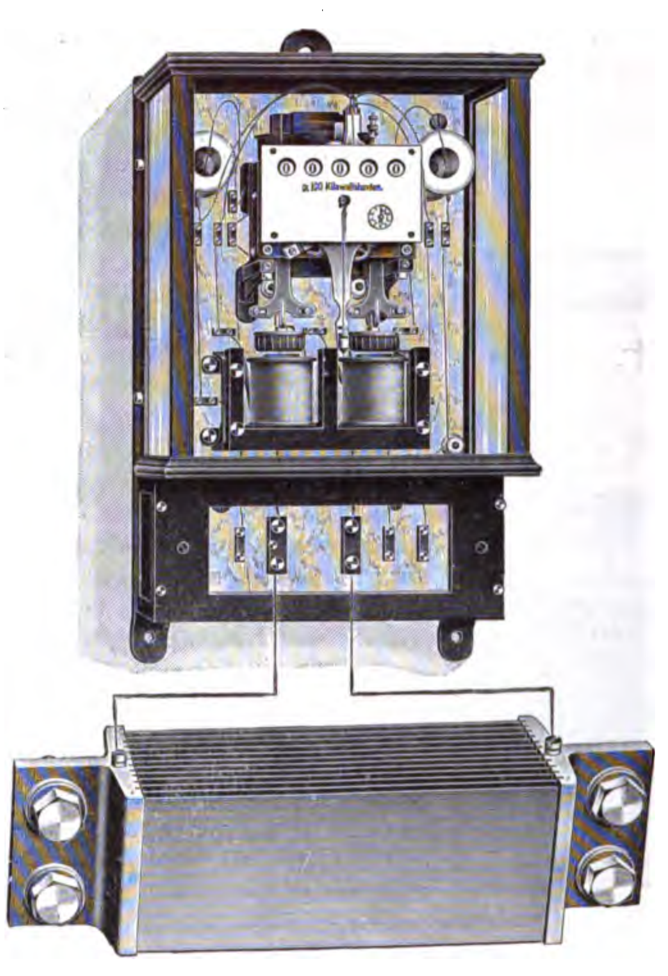


Fig. 35.

Das dritte Subtraktionsglied stellt also die durch die Einwirkung des neutralen Leiters bewirkte Korrektion dar, die an dem Ergebnis der reinen Zweiwattmeter-Messung angebracht werden muß, um die durch die vierte Leitung bewirkte Störung in den Verhältnissen des einfachen Dreiphasensystems zu berücksichtigen. Für die vollständige Genauigkeit dieser Messung ist allerdings, wie ORLICH, ETZ. 1907, S. 71 nachgewiesen hat, die praktisch nicht immer zutreffende Annahme Voraussetzung, daß die Summe der 3 Phasenspannungen immer gleich Null ist.

44. Der normale Umschaltzähler.

Nachdem im Vorstehenden die Normalausführung des ARON-Zählers für Gleich- und Wechselstrom, welche in definitiver Ausführung eines solchen Apparates mit abgehobener Schutzkappe in Fig. 33 abgebildet ist, im einzelnen beschrieben ist, dürfte es zweckmäßig sein, die hieraus sich ergebenden wichtigsten Eigenschaften dieses Apparates kurz hervorzuheben. Die Genauigkeit des Zählers wird von der ausführenden Firma bei Neulieferung auf $\pm 2\,\%$ angegeben, während für die Nacheichung $\pm 3\,\%$ beansprucht werden. Von besonderer Wichtigkeit ist es, daß diese Genauigkeit über den ganzen Meßbereich des Zählers dieselbe ist, daß also der schlimmste Nachteil der anderen Zähler, insonderheit, wie im folgenden gezeigt wird, der Motorzähler, daß die Genauigkeit eines bei halber bis ganzer Belastung sehr gut messenden Zählers bei sehr schwachen Belastungen sich unverhältnismäßig verschlechtert, bei den Pendelzählern nicht vorhanden ist. Der Grund hierfür liegt in dem fundamentalen Meßprinzip, die reibungslose Beeinflussung der Schwingungsdauer eines oder zweier Pendel zur Messung der durchgeflossenen Strommenge oder Arbeit zu benutzen. Wohl ist in dem Apparat wie in jedem anderen mechanischen Triebwerk von Anfang an eine bestimmte Reibung vorhanden, die mit der Zeit zunimmt. Diese Reibung bleibt aber ohne jeden Einfluß auf das Meßresultat. Denn für die Genauigkeit und Unveränderlichkeit der Messung ist lediglich Hauptbedingung, daß die Schwingungsdauer der Pendel die gleiche bleibt. Letztere hängt aber in keiner Weise von den Reibungsverhältnissen im Apparat ab, bleibt vielmehr so lange konstant, als sich die Gewichts- und Längenverhältnisse der Pendel nicht ändern; dies ist natürlich praktisch ohne weiteres anzunehmen. Wird daher dafür gesorgt, daß die Pendel in regelmäßigen Zwischenräumen den zur andauernden Bewegung derselben erforderlichen mechanischen Antrieb erhalten, so schwingen sie mit stets gleicher Schwingungszahl in der Zeiteinheit. Wächst daher die Reibung in dem Apparate, so ändert sich die Schwingungsdauer der Pendel in keiner Weise, nur die denselben mitgeteilte mechanische Energie wird schneller verbraucht und muß öfter erneuert werden. Da sich nun der Zähler mittels der vorhandenen Netzspannung

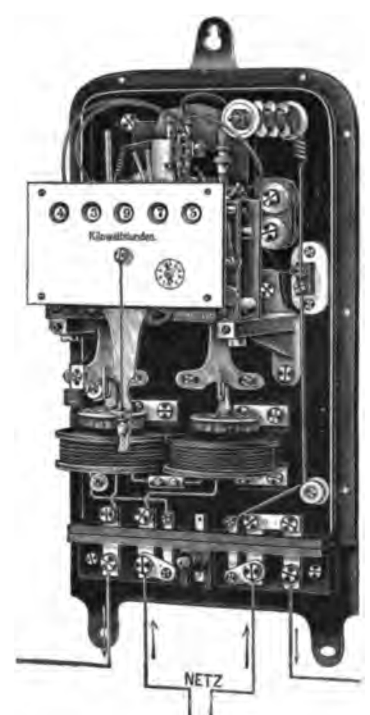


Fig. 33.

beginnt man die Ablesung von dem Momente, in welchem der kleine Zeiger des rechten Zifferblattes, d. h. der beschleunigten Uhr auf genau 80 steht, und mißt nunmehr die Schwingungen, welche das linke Uhrwerk ausführen muß, um den linken Schwingungszeiger ebenfalls auf 80 zu führen. In gleicher Weise verfährt man beim Ende der Messung. Die Differenz beider Ablesungen, die man so in Minuten und Schwingungen erhält, wird auf Schwingungen überführt, indem man die Anzahl der Minuten mit 80 multipliziert. Die so erhaltene Differenz der Schwingungszahlen, welche direkt der verbrauchten Energie proportional ist, ergibt durch Multiplikation mit der Konstanten des Zählers die tatsächlich durchgeflossene elektrische Arbeit.



Fig. 37.

Für rein transportable Zwecke, nämlich zum Gebrauch in elektrischen Wagen, Straßenbahnen u. dgl. hat Aron einen besonderen Zähler konstruiert, bei dem die Zeitmessung statt durch Pendelschwingungen durch solche einer elektrisch beeinflußten Unruhe erfolgt, da die Erschütterungen eines solchen Wagens die Benutzung von Pendeln nicht zulassen. Der Zähler weicht in der übrigen Anordnung, bezüglich elektrischem Selbstaufzug, periodischer Umschaltung von Spannungsstrom und Zählwerk im Prinzip in keiner Weise von dem normalen Umschaltzähler ab, wenn auch die konstruktive Ausführung dem Verwendungszweck entsprechend eine andere ist. Die Hauptstromrollen können um 25 % überlastet werden, ohne daß Meßgenauigkeit die garantierte Prozentzahl überschreitet. Letztere beträgt die im ganzen Meßbereich, der praktische Bedeutung hat, $\pm$ 3 %. Die Zähler gehen von selbst an, sobald die angelegte Spannung die Höhe von 80 % des normalen Betrages erreicht. Eine federnde Aufhängung ist nicht erforderlich.

Die von Aron ebenfalls konstruierten und vielfach in Praxis eingeführten Doppeltarifzähler und solche mit Höchstverbrauchanzeiger sind in dem späteren dieser Sonderklasse von Zählern gewidmeten Abschnitt näher beschrieben, worauf hiermit verwiesen wird.

D. Motorelektrizitätszähler.

a) Auf magnet-elektrischem Prinzip beruhende Amperestundenzähler.

Allgemeines.

49. Billiger Preis.

Wie schon mehrfach betont wurde, ist der moderne Zählerbau in erster Linie von dem Bestreben beherrscht, einen billigen Zähler zu bauen. Wenn nun auch der Motorzähler an sich zweifellos heute den günstigsten Kompromiß zwischen Billigkeit sowie den anderen von einem Elektrizitätszähler zu erfüllenden Bedingungen darstellt, so lassen doch die besten und billigsten Wattstundenzähler neuester Ausführung noch in diesem Kostenpunkte zu wünschen übrig. Die allgemein von einem heutigen Zähler geforderte Genauigkeit, die in einigen Ländern wie Deutschland und Österreich-Ungarn sogar gesetzlich festgelegt ist, und die wesentlich zu unterschreiten schon die Rücksicht auf die Konkurrenz verbietet, macht eine weitere wesentliche Verminderung des Preises etwa durch gröbere Ausführung oder Wahl schlechterer Materialien unmöglich. Es bleibt also nur übrig, zu diesem Behufe ein grundsätzlich einfacheres System zu wählen, und kommt man so zum Amperestundenzähler zurück, der ja den Ausgangspunkt der Zählertechnik bildete.

50. Kein Eigenverbrauch.

Man verließ damals die Amperestundenzähler, da dieselben neben anderen Nachteilen — die dem hierfür anfänglich überwiegend angewendeten elektrolytischen Meßprinzip eigen waren — von der grundsätzlichen Unvollkommenheit nicht zu befreien waren, lediglich die Amperestunden mit voller Vernachlässigung aller Schwankungen der Netzspannung zu registrieren. Die Zentralentechnik konnte derart konstante Netzspannungen damals noch nicht gewährleisten, selbst bei reinem Lichtbetrieb, daß man ihre Schwankungen entweder wegen ihrer Kleinheit hätte vernachlässigen oder durch eine gewisse Regelmäßigkeit als sich für eine mittlere Normalspannung aufhebend betrachten können. Nachdem nunmehr auch die Zentralen in ihren Maschinen und Einrichtungen sowie in ihrer Betriebsführung entsprechende Fortschritte gemacht hatten, glaubte man mit gutem Gewissen sich der neuerdings hergestellten einfacheren und billigeren Motor-Amperestundenzähler bedienen zu können, dies um so mehr, als dieselben außer dem billigeren Anschaffungspreis noch im praktischen Dauerbetriebe wesentliche Ersparnis an Stromkosten ermöglichen. Wie aus der folgenden Beschreibung der neueren Typen des Amperestundenzählers hervorgeht, weisen dieselben sämtlich die Annehmlichkeit auf, daß die Netzspannung, weil ohne Einfluß auf die Messung, nicht in den Apparat eingeführt zu werden braucht, so daß ein dauernder Verbrauch von elektrischer Energie, wie in dem Nebenschlußkreis der Gleichstrom-Wattstundenzähler, hier vollständig entfällt. Nun sind diese kleinen billigen Amperestundenzähler in erster Linie für kleinere Anschlüsse bestimmt, um durch Heranziehung auch schwächerer Stromverbraucher die allgemeine Rentabilität der Zentrale zu heben. Würde man statt dessen einen mit ständigem Nebenschlußverbrauch behafteten Wattstundenzähler benutzen, so kann der Fall leicht eintreten, daß der ständige Eigenverbrauch des Zählers einen erheblichen Bruchteil desjenigen des Konsumenten ausmacht, so daß schließlich der Verdienst der Zentrale aus dem Verbrauch des

Konsumenten gerade zur Deckung der Stromkosten des Zählers ausreicht. Diese Verhältnisse werden um so mißlicher, je höher die Zentralenspannung ist. Es arbeiten heute sehr viele Werke aus bekannten Gründen wirtschaftlicher Natur mit 220 Volt, und beträgt der Energieverbrauch des Spannungssystemes hierbei, wie schon bei dem sehr empfindlichen und daher geringen Eigenverbrauch aufweisenden ARON-Zähler zu ersehen war, im Mittel 4 Watt. Das macht für den Tag rund eine Hektowattstunde oder im Monat 3 KWSt. Nimmt man nun den mittleren täglichen Stromverbrauch eines solchen Konsumenten bei täglich 3 Brennstunden zu 240 Watt, so verbraucht er im Monat 7·2 KWSt. Der Zähler verbraucht also knapp die Hälfte der Energie, die er messen soll. Sinkt dagegen, wie im Sommer, der Stromverbrauch des Konsumenten noch unterhalb dieses Betrages, oder entnimmt derselbe z. B. während einer längeren Reise überhaupt keinen Strom, so kann der ursprüngliche Zweck der Anbringung des Zählers in das direkte Gegenteil verkehrt werden. Der von jedem Nebenschlußverbrauch freie Amperestundenzähler ist in solchen Fällen ein willkommenes und in der Beziehung des Eigenverbrauches vollkommenes Hilfsmittel.

51. Einschränkungen seiner praktischen Anwendung. Vorstehende zugunsten des Amperestundenzählers sprechende Beweisführung bedarf allerdings hinsichtlich ihrer allgemeinen Nutzanwendung bestimmter Einschränkungen. Die Annahme, daß die heutigen Zentralen genügend konstante Netzspannung halten, so daß mit der Messung der Amperestundenzahl ausreichende Genauigkeit erzielt wird, trifft allgemein nicht zu. Die fast in allen Werken vorhandene Kraftabgabe an Motoren ist in dieser Beziehung um so bedenklicher, je kleiner das Werk ist. Aber auch in größeren Zentralen, mit überwiegendem Lichtbetrieb kommen auch heute noch derartige Ungleichheiten der Netzspannung vor, die die Verwendung von Amperestundenzählern mit der zu erzielenden Mindestgenauigkeit völlig unvereinbar machen. Die Praxis der überwiegenden Benutzung von Wattstundenzählern erbringt den schlagendsten Beweis hierfür.

Auch die weitere Betrachtung des möglicherweise auftretenden Mißverhältnisses zwischen Eigenverbrauch eines Wattstundenzählers und Stromverbrauch eines kleinen Abnehmers bedarf einer Berichtigung. Nach der neueren dem Mehrfach- und Maximalstromtarif zugrunde liegenden Anschauung über die Bedeutung des einzelnen Anschlusses für die Gesamtjahresbelastung der Zentrale darf der zum Betriebe des Zählers erforderliche Strom nicht mit gleichem Maßstabe, d. h. zum gleichen Preise gemessen werden wie der von dem Konsumenten verbrauchte Strom. Muß dieser notwendigerweise mit den direkten, wie indirekten Betriebskosten und darüber hinaus noch mit einem Zuschlag, zur Erzielung eines Gewinnes belastet werden, so muß der Eigenverbrauch des Zählers dagegen unbedingt den allgemeinen Betriebsunkosten zugerechnet werden, d. h. darf man zu seiner pekuniären Auswertung nur die direkten Ausgaben an Heiz- und Schmiermaterial in Ansatz bringen, da die allgemeinen Unkosten für Verwaltung, Zinsendienst usw. davon völlig unabhängig sind, und muß man zur gerechten Beurteilung der Bedeutung des Eigenverbrauches eines Zählers diesen nicht mit dem von dem betreffenden Konsumenten zu erwartenden Stromverbrauch, sondern mit der Gesamtjahresleistung der Zentrale vergleichen. So betrachtet, verschwindet natürlich der Eigenverbrauch der Zähler vollkommen, und berechnet man ihn nun lediglich nach den direkten Betriebskosten, so stellt sich der Gebrauch eines Wattstundenzählers schon harmloser dar. Zur Entscheidung

der Frage, ob Amperestunden- oder Wattstundenzähler, müssen eben in jedem einzelnen Falle sämtliche mitwirkenden Momente sorgfältig in Rechnung gezogen werden, insonderheit auch die aus der Betriebssicherheit des einen und anderen Systemes sich ergebenden jährlichen Reparatur- und Amortisationskosten. So weit der Eigenverbrauch hierbei in Frage kommt, wird man folgende drei Möglichkeiten genau zu prüfen haben, nämlich in welchem Falle sich die Zentrale endgültig besser steht:

1. ob ein oder 100 solch kleiner Abnehmer überhaupt nicht angeschlossen sind, wobei jeder Eigenverbrauch, die Anschaffungskosten der Zähler und eine vielleicht unerwünschte höhere Belastung der Zentrale in den Stunden ohnehin schon starker Beanspruchung vermieden werden,
2. ob unter Wegfall jedes dauernden Eigenverbrauches sich die Anschaffung der billigeren Amperestundenzähler lohnt, indem man hierbei die denselben innewohnende Unvollkommenheit, alle Änderungen der Netzspannung unberücksichtigt zu lassen, mit in Kauf nimmt, oder
3. ob schließlich ein höheres Interesse der Zentrale nach der Richtung vorliegt, durch Gewinnung mehrerer solcher kleiner Teilnehmer denselben auch diese kleinere Strommenge aber zu dem betreffenden hohen Lichttarife zu verkaufen, wobei der nach den direkten Selbstkosten zu berechnende Eigenverbrauch der Wattstundenzähler dadurch mehr wie ausgeglichen wird, daß diese Zählergattung jene zu dem höheren Tarif abgegebene Energie viel genauer zu messen gestattet wie die billigeren aber auch ungenaueren Amperestundenzähler.

In vielen Fällen wird man so durch sorgfältige Abwägung dieser verschiedenen Einflüsse doch schließlich dem teueren und mit Eigenverbrauch behafteten Wattstundenzähler den Vorzug geben. Auf jeden Fall ergibt sich aus vorstehenden Überlegungen in Übereinstimmung mit der Praxis, daß die größere Einfachheit und Billigkeit des Amperestundenzählers in Verbindung mit gänzlichem Freisein von Eigenverbrauch bei offenem Stromkreis unbestrittene und schwerwiegende Vorzüge dieses Apparates sind, woraus es sich leicht erklärt, weshalb dieser Apparat in den letzten Jahren eine so große Verbreitung gefunden hat und fast sämtliche Fabrikanten von Zählern seine Herstellung aufgenommen haben.

Der O'K-Zähler.

53. Theorie des ungebremsten Amperestundenzählers von O'Keenan.

Diese neuere Entwickelung des billigen und einfachen Amperestundenzählers ist das zweifellose Verdienst des Ingenieurs O'Keenan, der um das Jahr 1900 in Paris den nach ihm benannten Zähler konstruierte. Derselbe besteht aus einer kleinen magnetelektrischen Triebmaschine, bei der in dem rotierenden Anker alle Eisen- und Wirbelstromverluste auf das sorgfältigste vermieden sind. Der Apparat stellt sich als eine Weiterentwickelung bzw. Übertragung des von Deprez-d'Arsonval aufgestellten und von dem Amerikaner Weston so erfolgreich praktisch ausgebildeten Drehspul-Meßprinzipes, wie dasselbe bereits in den vorhergehenden Teilen dieses Buches ausführlich beschrieben ist, auf die zeitliche Summierung und Messung elektrischer Strommengen dar.

Dieses Drehspul-Meßprinzip beruht bekanntlich darauf, daß ein in einem

magnetischen Felde drehbar angeordneter Stromleiter eine seitliche Verschiebung erleidet, wobei diese ablenkende Kraft ein Maximum wird, wenn die drei Richtungen von Leiter, magnetischem Feld und Bewegung aufeinander senkrecht stehen. Durch entsprechende mechanische und magnetische Anordnung erzielt man, daß diese Bedingungen größter Empfindlichkeit für den Anschlag der Stromspule von meistens 90° gewahrt bleiben. Indem man dieser ablenkenden Kraft die Torsionskraft einer oder zweier Spiralfedern entgegenwirken läßt, erhält man in dem Ausschlag ein Maß des den Stromleiter durchfließenden Stromes. Aus bekannten Gründen führt man die Messung größerer Stromstärken, d. h. über ca. $^1/_{10}$ Ampere hinaus nach der Nebenschlußmethode aus, d. h. man läßt die Drehspule und die stromzuführenden Torsionsfedern nur von einem Bruchteil des Gesamtstromes durchfließen, durch dessen Messung man bei bekanntem und konstantem Verhältnis der Widerstände des Instrumentes sowie des Abzweigwiderstandes indirekt die Stärke des Gesamtstromes mißt. Man kann diesen Meßvorgang mit gleichem Rechte in zweifacher Weise bezeichnen und deuten: das Instrument mißt die Stärke des Teilstromes, oder es mißt die Spannung an den Enden des bekannten Abzweigwiderstandes.

Läßt man nun die Spule, ohne ihrer Bewegung durch eine Torsionsfeder entgegenzuwirken, der ablenkenden Stromkraft frei und unbehindert folgen, und sorgt dafür, daß in dem Moment, wo dieselbe aus dem magnetischen Felde heraus in die neutrale Zone tritt, die Richtung des Stromes umgekehrt wird, etwa durch Zuführung des Stromes durch einen zweiteiligen Kommentator, so tritt eine kontinuierliche Rotation ein, man hat es nun mit einem magnetelektrischen Rotationsapparat oder Magnetmotor zu tun, der sämtlichen Gesetzen dieser Apparate unterworfen ist. Das wesentliche Moment ist hierbei, daß in einem solchen Motor sofort bei Beginn der Bewegung eben durch dieselbe eine Gegen-EMK induziert wird, die dem ursprünglichen Strom entgegenwirkt. Da die von dem Motor nutzbar geleistete mechanische Arbeit nun gleich dieser Gegen-EMK multipliziert mit der Stromstärke ist, so ergibt sich hieraus das Gesetz seines maximalen Wirkungsgrades dahin daß der Motor um so günstiger arbeitet, je mehr sich die Gegen-EMK der ihm primär aufgedrückten EMK nähert. Den idealen Grenzfall bildet daher die Gleichheit von primärer EMK und Gegen-EMK; der durch das Verhältnis beider EMKe ausgedrückte Wirkungsgrad beträgt 100 %, es geht dann in dem Motor selbst keine Energie verloren. Dies ergibt sich einfach daraus, daß bei Gleichheit beider EMK die Stromstärke gleich Null ist. Diesen idealen Grenzfall tatsächlich zu erreichen, macht die stets in dem Motor vorhandene mechanische Reibung unmöglich, bei Leerlauf wird sich der Motor daher mit der Tourenzahl um so mehr der zur Erzeugung der primären EMK erforderlichen nähern, und die Stromstärke wird um so kleiner ausfallen, je kleiner die mechanische Reibung ist. Sorgt man daher durch die mechanische Konstruktion für möglichste Verringerung dieser Leerlaufsarbeit, so wird die Gegen-EMK sich nur um ein geringes, in Praxis nur um Bruchteile eines Prozentes, von der primären EMK unterscheiden. Da nun diese Gegen-EMK der Geschwindigkeit des Motors direkt proportional ist, so stellt diese ein direktes Maß der an den Klemmen des Motors herrschenden Spannung dar. Legt man also einen nach diesen Prinzipien gebauten möglichst reibungslosen kleinen Motor an die Klemmen eines Abzweigwiderstandes, so wird seine Geschwindigkeit ein direktes Maß des den Widerstand

durchfließenden Stromes bilden, ein auf ihn gesetzte Gyroskop würde als Amperemeter zu gebrauchen sein. Läßt man statt dessen seine Achse ein Zählwerk treiben, so registriert der Apparat die Amperestunden.

58. O'K-Zähler der Danubia A.-G.

Der nach diesem Prinzip von O'Keenan gebaute Amperestundenzähler, meist nach der herstellenden Firma „Danubia A.-G. für Gaswerks-Beleuchtungs- und Meßapparate", Wien und Straßburg i. Els., kurz Danubia-Zähler genannt, ist in seiner neueren Ausführungsform in den Fig. 38 und 39 wieder-

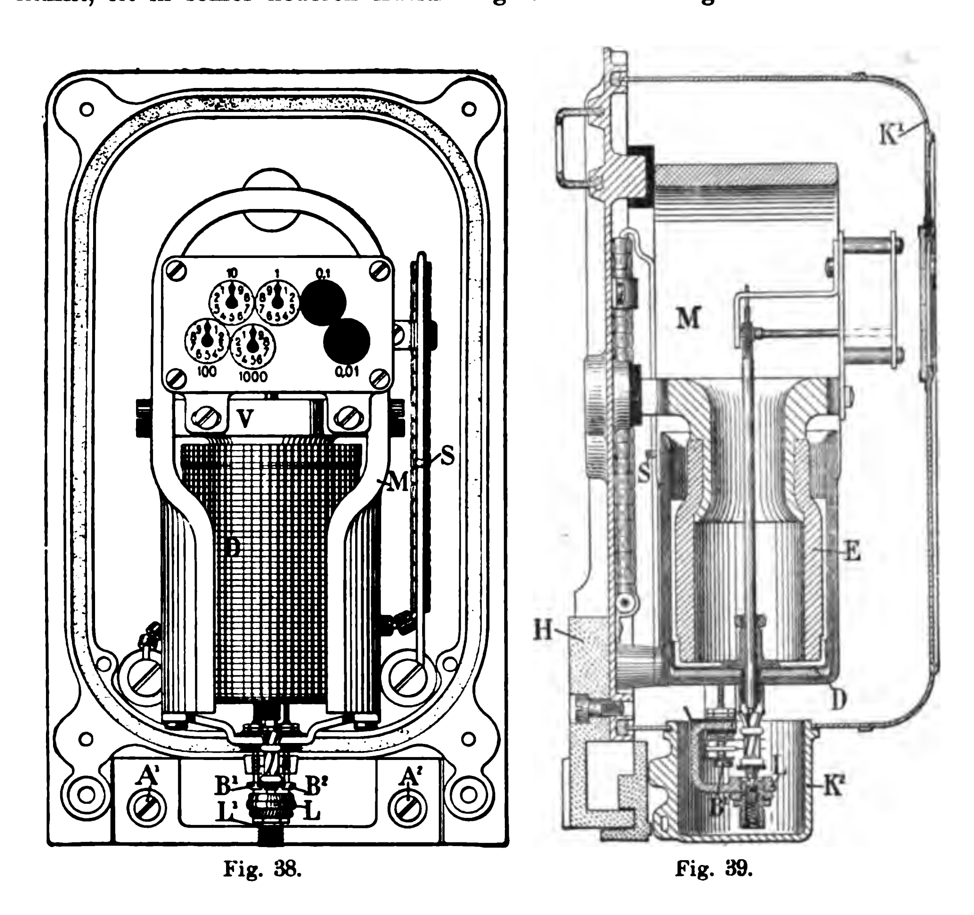


Fig. 38. Fig. 39.

gegeben. Er besteht in der Hauptsache aus dem Gehäuse samt Schutzkappe K^1, dem Magnetmotor MD samt Zählwerk und dem Abzweigwiderstande.

Die aus Zinkguß hergestellte Rückplatte trägt an ihrer Rückseite das zur Aufnahme der Anschlußklemme A^1 A^2 bestimmte Hartgummistück H. Die Kappe K^1 aus gepreßtem Zinkblech findet ihre Führung in einer in der Rückwand vorgesehenen Nut, und schließt hierdurch, mit Hilfe von in die Nut eingelegtem Dichtungsmaterial den Zähler mit Ausnahme der unteren Lageröffnung nach außen dicht ab. In dem unteren Teile der Kappe K^1 ist mittels Hakenverschlusses eine Büchse K^2 angebracht, durch deren Entfernung der Kollektor sowie das untere Lager zugängig gemacht wird. Das magnetische Feld des Motors wird durch den flaschenförmig gebogenen permanenten Magneten M gebildet, der durch das zwischen seinen Polen konzentrisch angeordnete schmiedeeiserne Röhrenstück E seinen magnetischen

Schluß findet und mit demselben durch einen an dem Röhrenstück angegossenen Zinkkörper mechanisch verbunden ist. Dieser Zinkkörper dient weiterhin zur Befestigung des ganzen Magnetmotors an der Rückwand, sowie an der Vorderseite zur Anbringung des Zählwerkes. An dem Zählwerk seinerseits ist das obere Halslager der Ankerachse angebracht, während das untere Ende der 17 cm langen Achse in dem unteren Lagerkörper L seinen Stützpunkt findet. Letzterer ist an einer die beiden unteren Endflächen des Magneten M verbindenden Brücke angebracht, und trägt außerdem die beiden Bürstenträger $B^1 B^2$. Der in dem Zwischenraum von Magnet und innerem Eisenkern umlaufende Anker ist nach Art einer Glocke ausgeführt und enthält keinerlei Eisen. Hierdurch werden bei der Rotation alle irgendwie gearteten Eisenverluste ausgeschieden. Der Boden D sowie der obere Spulenrand sind aus Messingblech gefertigt, und werden beide Teile durch eine Mikanitröhre mechanisch miteinander verbunden. Auf dem so gebildeten Ankerkörper wird die aus vier Strängen gebildete Ankerwickelung, je aus 100 Windungen von je 2 Kupferdrähten von 0·33 mm Durchmesser bestehend. untergebracht. Der Anker stellt also eine glockenförmig ausgeführte Trommelwickelung dar, welche den Strom durch einen vierteiligen Kollektor und zwei Schleifbürsten zugeführt erhält. Letztere bestehen aus feinem Silberblech, sind auf die Bürstenhalterstifte drehbar aufgesetzt und können mit leichtem Druck, dessen Stärke durch Federn regulierbar ist, an den Stromwender angedrückt werden. An der Auflagestelle am Kollektor sind sie auf Hochkant gestellt, um hierdurch die Reibung möglichst zu vermindern.

Das Zählwerk besitzt 6 Zeiger, welche je nach der Kapazität des Apparates in Kilowattstunden, Zehntel und Hundertstel dieser Einheit eingeteilt sind. Der größte Teil des Stromes geht durch den aus einem Konstantandraht von 35 cm Länge gebildeten Hauptstromwiderstand, dessen Stärke je mit der zu messenden Maximalstromstärke variiert. Die Enden des Konstantandrahtes sind mittels eingelöteter starker Messingringe mit den Anschlußklemmen $A^1 A^2$ verschraubt, und geht die Stromleitung zu den Bürsten einmal von einer dieser Anschlußklemmen, dann von einem Schieber S aus, mittels dessen die Stromabnahme von verschiedenen Stellen des Hauptstromwiderstandes regelbar erfolgen kann.

Der Zähler weist in Konstruktion und Ausführung eine große Einfachheit auf, und erzielt trotzdem eine relativ hohe Genauigkeit. Das angewendete Meßprinzip macht irgendwelche Bremsvorrichtungen und Kompensationsspulen überflüssig, so daß der Apparat zu einem verhältnismäßig niedrigen Preise mit großem Erfolg in Praxis eingeführt werden konnte. Ein weiterer Vorzug des ihm zugrunde liegenden Meßprinzipes ist seine Unabhängigkeit von Temperaturschwankungen, da seine Geschwindigkeit, praktisch völlig unabhängig von der verschwindend kleinen Stromstärke, nur von der Gegen-EMK der Bewegung abhängt, letztere aber von Widerstand und Temperatur unabhängig ist. Diese Abhängigkeit von Temperaturdifferenzen bildet bekanntlich bei der indirekten Strommessung nach der Nebenschlußmethode einen erheblichen Mangel.

Die Hauptbedingung für ein genaues Arbeiten des Apparates, die größtmögliche Verminderung der Leerlaufsarbeit, d. h. der mechanischen Reibung. wird nicht sowohl durch eine besonders delikate Ausführung derjenigen Stellen, an denen die Reibung auftritt, wie Lager und Kollektor, erzielt. als vielmehr durch eine große elektrische Empfindlichkeit, d. h. durch ein

starkes magnetisches Feld, und guten magnetischen Schluß. Angestellte Messungen haben ergeben, daß der Wirkungsgrad oft über 99 % beträgt, ungeachtet der einfachen mechanischen Ausführung. Die Hauptreibung findet hierbei nicht in den Lagern und im Zählwerk statt, sondern an dem Kollektor. Da die Empfindlichkeit des Apparates ausreicht, so hat man von irgendwelchen weiteren Mitteln zur Verminderung oder Kompensierung der Reibung, wie sie bei den im folgenden zur Besprechung kommenden Wattstundenzählern üblich und notwendig sind, hier absehen können. Infolge des relativ hohen Gewichtes des Ankers wird der Apparat für den Transport arretiert. Zu diesem Zweck ist die untere Lagerschraube L^1 doppelseitig ausgeführt. Im Arbeitszustande des Motors wird die dem unteren gehärteten Spurzapfen der Achse als Lager dienende Saphirpfanne im Innern der Lagerschraube durch eine Feder nach oben gegen den Spurzapfen gedrückt. Soll nun der Zähler arretiert werden, so schraubt man die Lagerschraube L^1 einmal heraus und dann mit dem umgekehrten Ende, welches keine Steinpfanne trägt, wieder ein. Die Entarretierung vollzieht sich in umgekehrter Weise.

Der Eigenverbrauch des O'K-Zählers ist ein äußerst geringer, und ist besonders der Effektverbrauch in dem Ankerstromkreis zufolge der sehr hohen Gegen-EMK ein verschwindend kleiner. Die Spannungsdifferenz an den Klemmen des Abzweigwiderstandes beträgt ca. 0·5 Volt.

Seit einigen Jahren baut die Gesellschaft noch einen besonderen Dreileiterzähler — siehe Fig. 40 —, bei dem wie bei dem WRIGHTschen Zähler der neutrale Leiter den Abzweigwiderstand in der Mitte berührt und sich nach seinen 2 Enden hin verzweigt. Hierdurch wird unabhängig von jeder Belastung der beiden Zweige eine genaue Registrierung der in dem Dreileiternetz verbrauchten Energie gewährleistet. Es sind 2 Anker vorhanden, wogegen das magnetische Feld für beide Anker durch einen doppelschenkligen Magneten gebildet wird. Die Registrierung erfolgt ebenfalls an einem gemeinsamen Zählwerk.



Fig. 40.

Amperestundenzähler mit Bremsung.

54. Theorie des ungebremsten Amperestundenzählers.

Die bei dem O'K-Zähler durch Anwendung des Prinzipes vom maximalen Wirkungsgrade erreichte Proportionalität zwischen Geschwindigkeit und Spannung an den Enden des Abzweigwiderstandes läßt sich nun zweifellos auch auf dem anderen Wege erzielen, daß der Motor belastet wird, aber in der Weise, daß seine Geschwindigkeit sich in jedem Moment proportional zu der Spannung ändert. Eine gewöhnliche mechanische Belastung erfüllt offenkundig diesen Zweck nicht, indem sich hierbei die Geschwindigkeit annähernd mit dem Quadrat der Spannung ändert. Diese für ein genaues Arbeiten der gesamten Motorzähler — eben mit Ausnahme des soeben be-

trachteten O'K-Zählers — erforderliche Hauptbedingung wird, wie schon in der Einleitung angegeben ist, durch die magnetische Bremse erfüllt. Die von dieser verbrauchte Arbeit ist dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional, was aus der einfachen Überlegung hervorgeht, daß der in den Wirbelströmen einer solchen magnetischen Bremse in irgendeinem Moment verbrauchte elektrische Effekt durch das Quadrat der Spannung dieser Wirbelströme dividiert durch den Widerstand, den sie in ihren Strombahnen finden, gegeben ist. Dieser hängt außer von der geometrischen Gestalt nur von der Leitfähigkeit des betreffenden Materiales, aus dem die Scheibe hergestellt ist, ab, ist also bei einer bestimmten Temperatur eine Konstante. Da nun die Spannung direkt proportional der Geschwindigkeit ist, so ist die von der Bremse in jedem Augenblick verbrauchte Leistung dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional. Selbstverständlich kommt auch hierbei die Größe der in dem Apparat vorhandenen mechanischen Reibung sehr wesentlich in Betracht. Von dem Einfluß derselben kann man sich an der Hand der folgenden Überlegung ein genügendes Bild machen.

Stellen W und w die bezüglichen Widerstände des Abzweigwiderstandes und des Ankerstromkreises dar, ferner J und i die Stromstärke im äußeren ungeteilten Stromkreise sowie im Anker, und besitzt die Geschwindigkeit des Ankers bei einer bestimmten Stromstärke im äußeren Stromkreis den Wert u, so entsteht in dem Anker die Gegen-EMK $E \cdot u$. Hierbei entwickelt die magnetische Bremse eine mechanische Gegenkraft, die gleich Bu gesetzt werden kann, und welche daher eine Leistung Bu^2 verbraucht. Außer dieser Arbeit hat der Motor noch die Reibungsarbeit, ebenfalls proportional der Geschwindigkeit, gleich Ru zu leisten. Es ist nun die Klemmspannung des Ankers K

$$K = (J - i)\, W = Eu + iw$$

und die im Anker verbrauchte Leistung L

$$L = i\,(Eu + iw) = Bu^2 + Ru + wi^2.$$

Aus beiden Gleichungen ergeben sich die Werte

$$Eu = JW - i\,(W + w) \qquad \text{und} \qquad Ei = Bu + R.$$

Durch Vereinigung beider Gleichungen erhält man schließlich den Ausdruck für die Geschwindigkeit u

$$u = J\,\frac{WE}{E^2 + B\,(W + w)} - R\,\frac{W + w}{E^2 + B\,(W + w)}.$$

Die Geschwindigkeit u ist also zunächst, wie aus dem ersten Ausdruck der rechten Seite hervorgeht, direkt proportional der Stromstärke J in dem äußeren Stromkreise, dies jedoch nur unter der Bedingung, daß das zweite Glied, mit R multipliziert, verschwindend klein gemacht werden kann. Es tritt also hier die Reibung als die Genauigkeit der Messung direkt bestimmender und störender Faktor auf. Näheres hierzu ersehe man in dem folgenden Abschnitt der Wattstunden-Motorzähler.

Zufolge des dem O'K-Zähler erteilten gesetzlichen Schutzes haben die anderen Elektrizitätszähler herstellenden Firmen sämtlich dieses zweite Meßprinzip mittelst magnetischer Bremsung gewählt und hiernach eine Reihe voneinander nur sehr unwesentlich verschiedenen Konstruktionen auf den Markt gebracht. Man kann hierbei drei Gruppen unterscheiden, je nach der mechanischen Ausführung des Ankers sowie der Stromzuführung, nämlich

Zähler mit Trommelanker, solche mit scheibenförmigem Anker und schließlich Quecksilber-Motorzähler.

55. Der A.E.G.-Zähler.

Amperestundenzähler mit Trommelanker werden hergestellt von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, der Felten & Guilleaume-Lahmeyer-Werke A.-G., Abteilung Berlin, sowie Mix &

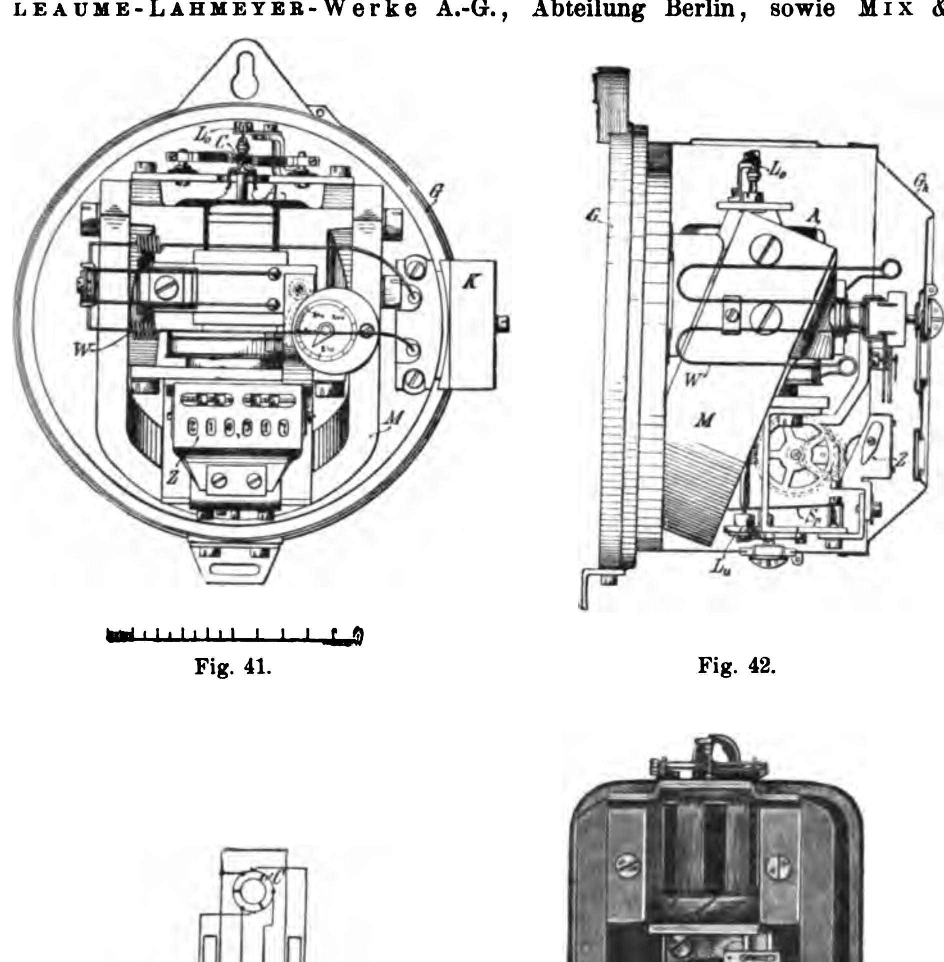
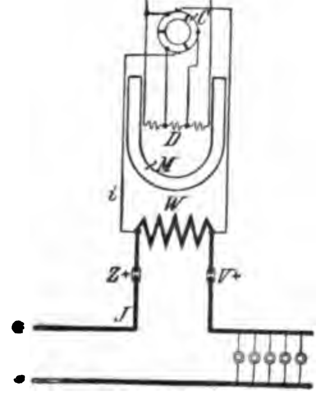


Fig. 41. Fig. 42.



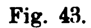


Fig. 43.



Fig. 44.

Genest A.-G., sämtlich zu Berlin. Fig. 41 und 42 ist der von der A.E.G. hergestellte Amperestundenzähler in 2 Ansichten dargestellt, welche seine Konstruktion genügend klar erkennen lassen. Die Schaltung ist in Fig. 43 wiedergegeben. Der aus mechanischen Gründen schräg angeordnete Magnet bildet mittels

zweier Polschuhe und dem zwischen denselben fest angeordneten röhrenförmigen magnetischen Schlußstück ein kräftiges magnetisches Feld, in welchem sich der mit einer dreiteiligen auf einer Aluminiumtrommel untergebrachten Wickelung versehene Anker dreht. Die Abgleichung des Zählers erfolgt je nach der Type dieses Zählers, deren es drei gibt, mittels eines Schiebers an dem regulierbaren Abzweigwiderstand oder durch Verstellung eines magnetischen Nebenschlusses, der sogar später, nachdem der Zähler die Fabrik verlassen hat, zwecks Korrigierung seiner Angaben verstellt werden kann. Die ebenfalls aus hochkant gestellten Silberblechen bestehenden Bürsten werden ähnlich wie beim O'K-Zähler leicht federnd an den Kollektor angedrückt. Der gleichfalls aus Konstantandraht bestehende Abzweigwiderstand wird für Ströme bis 10 Ampere im Apparat selbst, wie aus Fig. 41 und 42 ersichtlich, untergebracht, bei Zählern für 20 und 30 Ampere dagegen in einer an der Rückwand dafür besonders vorgesehenen Kapsel aus gelochtem Blech. Für Dreileiterzähler kommt hier ähnlich wie beim WRIGHTschen Zähler ein zweiteiliger Nebenschluß mit mittlerem Anschluß des Nulleiters zur Anwendung. Als Zählwerk wird ein solches mit springenden Zahlen benutzt.

56. Zähler der Felten & Guilleaume-Lahmeyer-Werke A.-G.

Eine sehr kompendiöse Ausführung eines Amperestundenzählers rührt von der FELTEN & GUILLEAUME-LAHMEYER-Werke A.-G. Berlin her, und ist in Fig. 44 wiedergegeben. Die an dem einfachen Hufeisenmagneten befestigten Polschuhe haben anders wie die bisher betrachteten Konstruktionen gerade Polflächen und liefern beim Einsetzen und Herausnehmen des mit Anker, magnetischem Kern, Achse und Zählwerk zu einem mechanischen Ganzen vereinigten beweglichen Systemes die erforderliche Gradführung. Der hierdurch etwas vergrößerte magnetische Widerstand, da die geraden Polschuhe dem Eisenkern nur in einer Linie nahestehen, soll dadurch ausgeglichen werden, daß eben hierdurch eine Verringerung des Abstandes auf ca. 2 mm möglich ist, während derselbe bei anderen Konstruktionen mit symmetrisch zum inneren Eisenkern gekrümmten Polschuhen 4 bis 6 mm betragen muß. Zweifellosen Vorteil bietet diese Konstruktion in rein mechanischer Beziehung, was Übersichtlichkeit, leichte Revision und Zusammenbau des Apparates anlangt. Die einfache Konstruktion wird weiter durch ein geringes Ankergewicht von ca. 30 g unterstützt, was eine Arretierung entbehrlich macht. Der ganze Apparat wiegt nur ca. 2·7 kg. Zur leichteren Kontrolle läßt sich die Umdrehungszahl der das Zählwerk betätigenden Schnecke durch einen vor ihr angebrachten und durch ein kleines Glasfenster von außen sichtbaren Zeiger leicht feststellen. Die Shuntspannung beträgt 0·7 bis 0·9 Volt. Der Kollektor ist durch eine obere leicht abnehmbare besondere Schutzkappe bequem zu revidieren. Das durch die Schnecke angetriebene Zählwerk besitzt springende Ziffern. Die Abgleichung des Zählers erfolgt ebenfalls durch Schieber am Hauptstromwiderstand. Bei größeren Stromstärken von 20 bis 50 Ampere wird der Hauptstromwiderstand getrennt vom Apparat geliefert.

Nach ähnlichen Grundsätzen ist der Amperestundenzähler der Firma MIX & GENEST A.-G. gebaut, der nach Wunsch mit Zählwerk mit springenden Ziffern oder mit Zifferblättern ausgerüstet wird.

57. Amperestunden-...

Zu der zweiten Gruppe der Magnetmotorzähler mit Scheibenanker gehören die Konstruktionen der Firmen SIEMENS-SCHUCKERT Werke. Berlin, Isariazähler-Werke G. m. b. H. München, deren Konstruktionen

neuerdings auch von Bergmann-Elektrizitätswerke A.-G. ausgeführt werden, John Busch, Pinneberg, Landis & Gyr, Zug, Keiser & Schmidt, Berlin, sowie Hartmann & Braun A.-G. Frankfurt a. M. Die Brennscheibe dient hierbei in gleicher Weise als Träger der Ankerwickelung, die als offene oder geschlossene Spulenwickelung ausgeführt wird. Die Konstruktionen der verschiedenen Firmen sind meistens nur in Einzelheiten ihrer mechanischen Ausführung unterschiedlich sowie in einigen Modifikationen der elektrischen Schaltung.

58. Zähler der Siemens-Schuckert Werke.

So führen die Siemens-Schuckert Werke ihren Amperestundenzähler auf Wunsch mit vom Konsumenten regulierbaren Hauptstromwiderstand aus. Es soll hierdurch, siehe Fig. 45a u. b, erreicht werden, daß der für eine bestimmte Netzspannung nach Kilowattstunden geeichte Zähler bei geringen Abweichungen der Netzspannung durch diese Einstellvorrichtung an dem Hauptstromwiderstand für jene andere Netzspannung ohne weiteres abge-

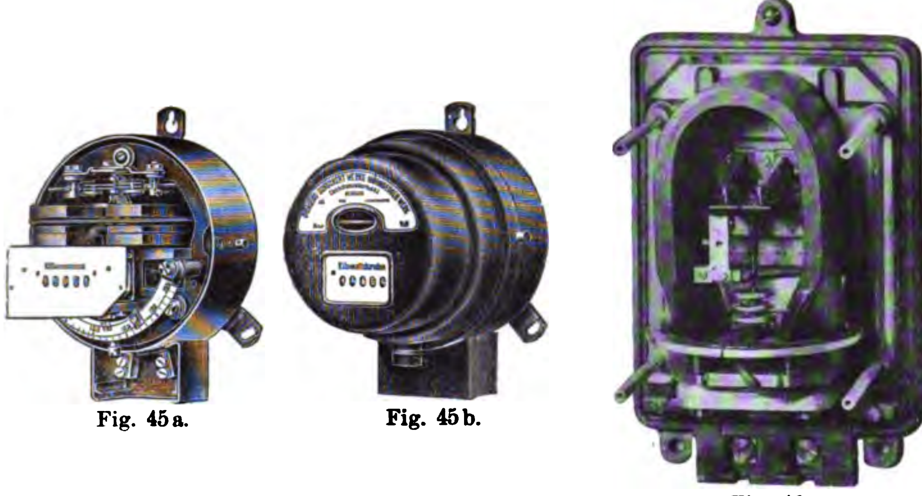


Fig. 45a. Fig. 45b. Fig. 46.

glichen werden kann, ohne einer Einsendung und Umeichung in der Fabrik selbst zu bedürfen. Der Bereich der Regulierung beträgt hierbei $\pm$ 10 %. Die Einstellvorrichtung ist jedoch nur nach Lösung der Plomben zugänglich.

59. Zähler von Hartmann & Braun A.-G.

Fig. 46 ist der von Hartmann & Braun A.-G. hergestellte Amperestundenzähler abgebildet, der eine besondere dreiteilige offene Ankerwickelung besitzt, die mit derjenigen für den Wattstundenzähler derselben Firma identisch ist und bei dieser Konstruktion im folgenden auch näher beschrieben ist. Der Amperestundenzähler besitzt noch eine besondere Vorrichtung, um den schädlichen Einfluß der Reibung, der sich verschieden in den unteren wie in den oberen Meßbereichen äußert, auszugleichen. Wie aus der Abbildung hervorgeht, wird der magnetische Rückschluß zu dem oberhalb der Scheibe befindlichen permanenten Magneten durch ein unterhalb des Ankers angebrachtes und entsprechend geformtes Stück aus weichem Eisen hergestellt. Die an demselben vorhandenen kurzen Pole tragen nun eine Hilfswickelung, die gleich dem Ankerstromkreis parallel an dem Hauptstromwiderstand anliegt. Dem liegt folgende Überlegung zugrunde. Eine Verstärkung des magnetischen Feldes hat eine doppelte Wirkung: es wird einmal die treibende Kraft vergrößert, zu gleicher Zeit aber auch die dämpfende

Wirkung erhöht. Da letztere nun mit dem Quadrat der Geschwindigkeit wächst, so wird die Anbringung dieser das magnetische Feld verstärkenden Hilfsspulen die für den Ausgleich der Reibung günstige Wirkung haben, daß bei schwacher Belastung des Zählers, wenn die Reibung zu groß ist, der Antrieb erhöht wird. Mit wachsender Geschwindigkeit und Spannung überwiegt jedoch von einem bestimmten Moment an die dämpfende Kraft und gleicht so den Umstand aus, daß bei großer Geschwindigkeit die Reibung relativ zu klein ausfällt, wodurch der Zähler zu schnell laufen würde.

60. Quecksilber-Motor-Amperestundenzähler.

Eine, wenn auch nicht im Prinzip, so doch in der mechanischen Konstruktion wesentlich von den bisher betrachteten Magnetmotorzählern verschiedene Ausführung weisen die besonders in England verbreiteten Quecksilbermotorzähler auf, wie dieselben von CHAMBERLAIN & HOOKHAM Ltd., Birmingham, und von der FERRANTI Ltd. in Hollinwood (Lancashire) hergestellt werden. Die verschiedentlichen dem Stromwender von Motorelektrizitätszählern anhaftenden Nachteile suchen diese Konstruktionen durch Benutzung des unipolaren Prinzipes zu umgehen. In gleicher Weise wie eine zwischen den Polen eines Magneten drehbare Scheibe einen konstanten Induktionsstrom liefert, den man durch Schleiffedern auf der Achse und am Rande der Scheibe einfach und sicher abnehmen kann, so erfährt dieselbe Vorrichtung einen gleichmäßigen mechanischen Antrieb, sobald man durch die Federn in die Scheibe einen elektrischen Strom gleichbleibender Stärke und Richtung schickt. Trifft man die mechanische Konstruktion so, daß die Scheibe, auch als Trommel oder Glocke ausführbar, auf einer senkrechten Achse rotiert, so kann man die Stromzuführung am Rande sowie an der Achse durch Quecksilberschichten ausführen. Auf diese Weise ist dann die gröbere und zeitlich veränderliche Reibung zweier fester Körper aufeinander durch die kleinere und zeitlich gleichmäßigere zwischen einem festen Körper und einer Flüssigkeit ersetzt. Hierbei können natürlich keinerlei Funken auftreten, die die Oberfläche an den Stellen des Stromüberganges und damit auch die Reibung verändern. Ferner ist auf diese Weise, bis auf sehr hohe Stromstärken, die Anwendung von Nebenschlüssen vermieden, die bei diesen

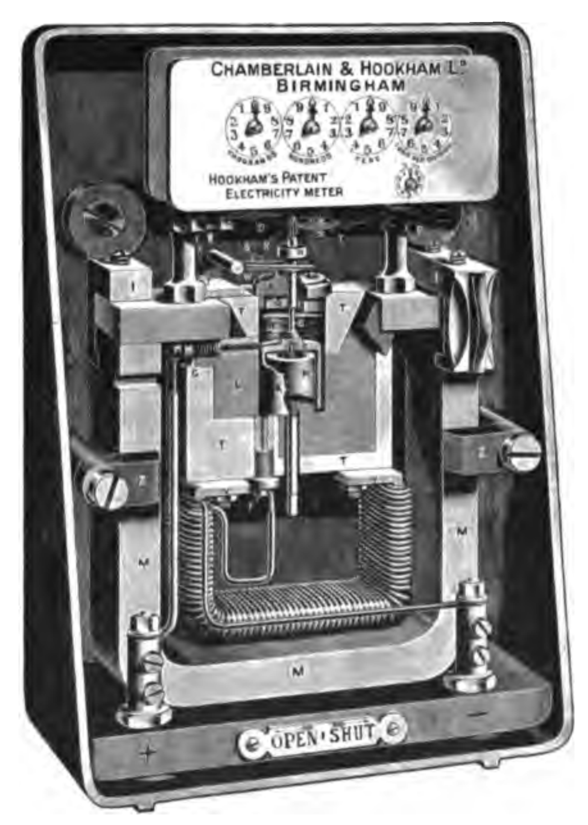


Fig. 47.

mit magnetischer Dämpfung arbeitenden Zählern immerhin etwas bedenklicher ist, als bei dem ohne dieselbe arbeitenden O'K.-Zähler. [1])

61. Zähler von Chamberlain & Hookham.

Der nach diesen Prinzipien von CHAMBERLAIN & HOOKHAM gebaute Zähler wird in 3 Größen hergestellt, für Ströme von $1^1/_2$ bis 5 Amp., für solche von 10 bis 100 Amp., diese sämtlich ohne Nebenschluß, dann über 100 Amp. mit Nebenschluß. Fig. 47 zeigt die Ausführung des Zählers für die schwächste Belastung bis zu 5 Ampere. Der permanente Magnet M bildet zwischen den entsprechend geformten Polschuhen L und K ein ringförmiges intensives magnetisches Feld, in dem sich die Armatur A, ein Kupferzylinder, drehen kann. Die sie tragende Achse B ist unten mittelst Steinlagers C auf dem Stahlzapfen E gelagert und findet ihre obere Führung in dem federnd angeordneten Lager D. Die durch die in einen Ebonitblock T eingelassenen Polschuhe so gebildete Kammer ist nach oben durch den Ebonitdeckel P abgeschlossen und bis zu der aus Fig. 48 ersichtlichen Höhe mit Quecksilber gefüllt. Die Armatur ist mit Ausnahme zweier ringförmiger amalgamierter Stellen am oberen und unteren Ende allenthalben verplatiniert. Der durch die Stromzuführungen G und F von der positiven Klemme ein- bzw. nach der negativen auftretende Strom wird so gezwungen, zu seinem überwiegenden Teile in dem zylindrischen und sich in dem magnetischen Felde drehenden Teil der Armatur seinen Verlauf zu nehmen. Auf der Achse B sind noch zwei Reguliergewichte Q und R vorhanden, die bewirken, daß der der kupfernen Armatur durch das Quecksilber erteilte Auftrieb gerade ausreicht, dieselbe annähernd in dem Quecksilber schwimmend zu erhalten, wodurch die Lagerreibung erheblich



Fig. 48.

[1]) Es ist hier auf einen bemerkenswerten Unterschied in den auf dem Kontinent einerseits und England andererseits herrschenden Ansichten und Gepflogenheiten hinzuweisen. In Deutschland und in den anderen Ländern des Kontinentes wird der Amperestundenzähler infolge der allgemeinen Anschauung von der grundsätzlichen Unvollkommenheit seiner Messung nur als ein mitunter nicht zu vermeidendes Übel betrachtet, und demgemäß nur für kleinere Anschlüsse bis 10 bis 15 Ampere, höchstens aber in einzelnen Fällen für 30 bis 50 Ampere gebaut und benutzt. Der mehr auf das Praktische, Derbe gerichtete englische Sinn gibt dem Amperestundenzähler eben seiner Einfachheit und größeren Robustheit wegen den Vorzug und läßt ihn unbekümmert um etwaige Bedenken mehr wissenschaftlicher Natur bis zur Messung mehrerer Tausende von Ampere benutzen. Es kann keinem Zweifel unterliegen, daß für Messung so hoher Stromstärken grundsätzlich nur Wattstundenzähler verwendet werden sollten.

vermindert wird. Zwecks Arretierung für den Versand usw. kann die Armatur mittelst der Vorrichtung *S* in die Höhe gehoben werden, wodurch das untere Steinlager *C* samt Stahlzapfen *E* vollkommen entlastet werden. Es drückt sich hierbei gleichzeitig eine auf dem Reguliergewicht *Q* vorhandene Gummidichtung *W* gegen den Ebonitdeckel *P* und stellt hierdurch einen vollkommenen Abschluß des Quecksilbers gegen Auslaufen dar, in welcher Stellung sich der Zähler auch immer befinden möge. Die Übertragung der Ankerumdrehungen auf das Zählwerk mit Zifferblättern erfolgt durch das auf der Achse *D* befindliche Rad im Eingriff mit dem Zählwerksrade *Y*.

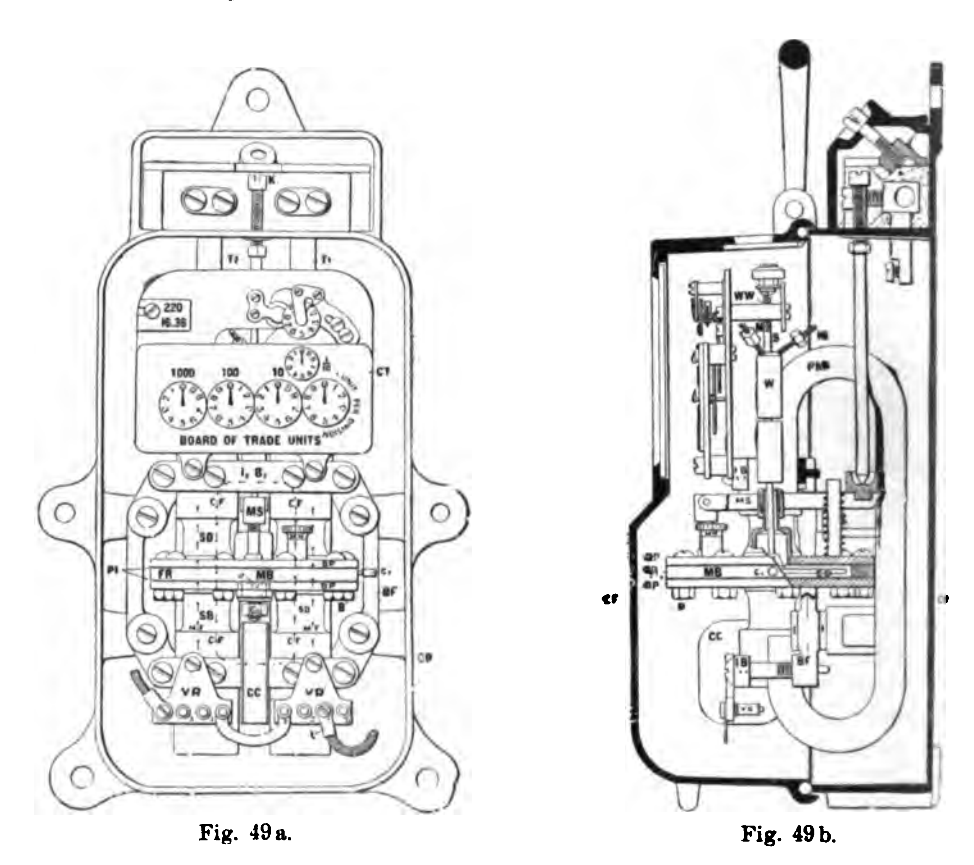


Fig. 49a. Fig. 49b.

Von Interesse ist die Art und Weise, wie die mit der Umlaufsgeschwindigkeit variable Reibung zwischen Quecksilber und Armatur ausgeglichen wird. Umgekehrt wie bei dem Amperestundenzähler von Hartmann & Braun, Fig. 46, angegeben wurde, wächst hier die Flüssigkeitsreibung mit der Geschwindigkeit. Um diesen die Genauigkeit des Zählers störenden Einfluß auszugleichen, ist die auf den Eisenkörper *VV* gewickelte Kompensationswickelung, in Reihe mit der Armatur geschaltet, vorgesehen. Das von dieser erzeugte magnetische Feld wirkt bei höherer Belastung und demgemäß wachsender Geschwindigkeit ebensowohl der die Armatur antreibenden, wie ihren Umlauf dämpfenden Kraft entgegen. Letzterer aber, weil mit dem Quadrat der Geschwindigkeit wachsend, in höherem Maße, so daß insgesamt eine Beschleunigung resultiert.

Der Zähler für Ströme von 10 bis 125 Ampere, siehe Fig. 48, weicht in der Konstruktion einigermaßen hiervon ab, indem statt der zylindrischen Armatur eine scheibenförmige vorhanden ist, welche der Strom in Richtung eines Durchmessers durchfließt. Es macht dies eine andere Führung des magnetischen Kreises nötig. Ferner findet die Dämpfung an einer besonders hierfür vorgesehenen Scheibe statt. Für Ströme von 100 bis 3000 Ampere wird dieses Modell mit scheibenförmiger Armatur mit besonderen Nebenschlüssen kombiniert, sei es in festem mechanischen Zusammenbau, sei es wie bei Schalttafelinstrumenten mit getrennten Nebenschlüssen unter Benutzung biegsamer in ihrem Widerstand abgeglichener Stromzuführungen. Der Zähler wird je nach Verwendungszweck und Aufstellung in gußeisernem Gehäuse, mit oder ohne vernickelten vorspringenden Teilen, oder in Glasgehäuse, von allen Seiten sichtbar, ausgeführt.

62. Der Ferranti-zähler.

Der Ferranti-Zähler, in seiner neueren Ausführung in den Fig. 49 a u. b und 50 a, b, c dargestellt, besitzt ebenfalls eine Kupferscheibe als Armatur, welche den Strom an der Peripherie und dem Mittelpunkt zugeführt erhält,



Fig. 50 a.



Fig. 50 b.



Fig. 50 c.

während die übrige Oberfläche in doppelter Weise, durch Verplatinierung und Emaillierung gegen leitende Berührung mit dem Quecksilber geschützt ist. Die Scheibe bewegt sich in einem mit Quecksilber ausgefüllten Hohlraum, der, wie aus den Abbildungen der Fig. 50 ersichtlich, aus 3 Teilen zusammengesetzt ist. Zwei Messingscheiben, an ihren einander zugewandten Seiten durch Preßspahnisolierung vor Berührung mit dem Quecksilber geschützt, werden mit Zwischenfügung eines als Distanzstück dienenden Fiberringes durch 9 Schrauben zusammengehalten und bilden hierdurch den für die Aufnahme der Ankerscheibe und des die Stromzuführung vermittelnden Quecksilbers bestimmten Hohlraum. Jede dieser beiden Messingscheiben trägt zwei Polschuhe, welche wiederum untereinander durch ein magnetisches Schlußstück verbunden sind. Das Quecksilber wird nach vollendeter Montage des Zählers durch die Öffnung *MH* eingefüllt, und wird die Öffnung danach durch eine Verschraubung geschlossen. Die Achse *S* läuft in dem unteren Steinlager *J*, in dem oberen Teile in einem entsprechend ausgeführten Halslager. Es sind auch hier Reguliergewichte *W* und *N* vorgesehen, welche so groß gewählt werden, daß die Armatur entgegen dem Quecksilberauftrieb eben zum freien Spiel gebracht wird. Der Strom tritt an der Peripherie durch Vermittelung der den Fiberring durchsetzenden Schraube *C* ein, durchströmt die Armatur von dieser Stelle aus nach dem Mittelpunkt, geht dort in die zentrale Quecksilberschicht über und wird von der hiermit in leitender Verbindung stehenden Schraube *C* zu der anderen Klemme geführt.

Das magnetische Feld wird durch die beiden *C*-förmigen Magnete *PM* gebildet, welche mit den vier Polschuhen magnetisch verbunden sind. Von diesen Polschuhen wirkt das eine Paar *SD* auf den die Kupferscheibe an

dieser Stelle durchfließenden Strom ablenkend ein, dämpft aber auch gleichzeitig seine Bewegung. Das andere Paar Polschuhe *SB* samt dem dazu gehörenden Magneten dient allein zur Dämpfung. In gleicher Weise nun wie bei dem Hookham-Zähler ist hier eine Kompensationsspule *CC* vorgesehen, welche die bei größerer Geschwindigkeit wachsende Reibung zwischen Armatur und Quecksilber ausgleichen soll. Zu diesem Zweck ist die mit dem Anker in Reihe geschaltete Spule *CC* auf dem die beiden unteren Polschuhe magnetisch überbrückenden Verbindungsstück angeordnet und die Stromrichtung in ihr so gewählt, daß, wie dies der in Fig. 49a eingezeichnete Kraftlinienverlauf *CF* erkennen läßt, der von ihr erzeugte magnetische Fluß demjenigen der den mechanischen Antrieb bewirkenden Polschuhe *SD* gleichgerichtet ist, dem anderen dagegen der beiden Polschuhe *SB*, die lediglich der Dämpfung dienen, entgegenwirkt. Da nun von beiden Paaren Polschuhe *SB* und *SD* die gleiche dämpfende Wirkung auf die Armatur ausgeübt wird, so ist klar, daß in dieser Beziehung die Spule *CC* keine Änderung hervorbringt, indem die Ankerscheibe in der einen Hälfte eine ebenso größere Dämpfung erfährt, wie diejenige in der anderen Hälfte vermindert wird. Es bleibt daher nur der die antreibende Kraft der Polschuhe *SD* stärkende Einfluß der Wickelung *CC* übrig, und wird so das gewünschte Resultat erzielt, daß bei größerer Belastung und Geschwindigkeit bei unverminderter Dämpfung der Antrieb erhöht wird. Zur Regulierung des Zählers dient außer den rein mechanischen Mitteln der Veränderung der Übersetzung zwischen Ankerwelle und Zählwerk noch die Einsetzung veränderlicher Nebenschlüsse zwischen den Stromklemmen *VR*. Es kann hierdurch die Umdrehungszahl um 5 $^0/_0$ geändert und hierdurch der Zähler fein eingestellt werden.

Der Apparat ist ebenfalls mit einer Vorrichtung zum dichten Abschluß des Quecksilbers versehen, was durch Drehung der Schraube *K* geschieht. Der Spannungsabfall ist ein äußerst geringer und beträgt z. B. bei einem 10 Amperezähler bei Vollast ungefähr 0·06 Volt. Der Zähler wird in ein gußeisernes Gehäuse isoliert eingebaut und durch dasselbe nach außen hin wasserdicht und staubsicher abgeschlossen. Bis zu 100 Amp. erfolgt die Stromzuführung zum Anker direkt, ohne einen besonderen Abzweigwiderstand. Darüber hinaus kommen besondere Nebenschlüsse zur Anwendung.

b) Auf dynamometrischem Prinzip beruhende Gleich- und Wechselstrom-Wattstundenzähler mit und ohne Eisen.

1. Rotationszähler.

Theorie und Allgemeines.

68. Theorie des Thomson-zählers.

Infolge der auch heute noch überwiegenden Anwendung von Gleichstrom ist der meistbenutzte Zähler der einfache Gleichstrom-Motorzähler in der von Prof. E. Thomson angegebenen Form, dessen Werdegang und wesentlichste Eigenschaften bereits in der historischen Entwickelung angegeben sind. Er besteht in der Hauptsache aus dem Zählmotor, meist ohne jedes Eisen, der magnetischen Bremse und dem Zählwerk. Seine Schaltung ist mit der eines auf dynamometrischem Prinzip beruhenden Wattmeters identisch.

sobald man anstelle der beweglichen Spule samt den Strom zuführenden Torsionsfedern den Anker mit Kollektor und Bürsten setzt. Der zu messende Strom J durchfließt die aus stärkerem Draht gefertigten Starkstromspulen, die das magnetische Feld bilden, in dem sich der meistens ebenfalls eisenlose Anker dreht. Dieser ist mit vielen Lagen dünnen Drahtes bewickelt und liegt in Reihe mit einem Vorschaltwiderstand an der Netzspannung E an, wird also andauernd von einem dieser Größe proportionalen Strom durchflossen. Der THOMSON-Zähler stellt daher mit geringen Ausnahmen ein eisenloses rein dynamometrisches Wattmeter dar, welches in gleicher Weise für Gleich- wie Wechselstrommessung verwendbar ist. Die mit dem unvermeidlichen Stromwender verbundenen Übelstände haben jedoch nach Entdeckung des Induktionsmeßprinzips dazu geführt, daß er heute ausschließlich nur für Gleichstrom benutzt wird, da er hier eben bisher durch keinen besseren und billigeren Apparat hat ersetzt werden können. Zur Wechselstrommessung kommt der THOMSON-Zähler meist nur bei geringen Periodenzahlen, wie 25 Perioden pro Sekunde zur Anwendung.

Sobald durch Einschaltung der Verbrauchsapparate der Stromkreis geschlossen ist, dreht sich der Anker mit einer mit wachsender Stromstärke höheren Geschwindigkeit um. Die Proportionalität zwischen Geschwindigkeit und der zu messenden elektrischen Arbeit wird auch hier durch eine magnetische Bremse erzielt, die aus einer auf der Ankerachse befestigten und sich im Felde eines oder mehrerer permanenten Magnete drehenden Metallscheibe besteht. Wie bereits bei den Amperestundenzählern im vorigen Abschnitt entwickelt wurde, ist die von einer solchen Bremse absorbierte Leistung L_1 dem Quadrat der Geschwindigkeit u proportional, also

$$L_1 = c_1 u^2.$$

Das von dem Anker entwickelte Drehmoment ist in jedem Falle in dem Produkt beider Ströme in Feld- wie Ankerspulen gegeben, also proportional $J i$. Da nun der Ankerstrom i proportional der Netzspannung E ist, so ist das Drehmoment auch proportional JE, die von dem Anker bei der Geschwindigkeit u entwickelte Leistung L_2 daher

$$L_2 = c_2 J E u.$$

Beide Leistungen müssen, soweit man die durch die mechanische Reibung in dem Apparat verzehrte Energie vernachlässigen kann, einander gleich sein

$$c_1 u^2 = c_2 J E u,$$
$$C u = J E.$$

Es ist also in jedem Augenblick die Umlaufsgeschwindigkeit des Ankers ein Maß der zu der betreffenden Zeit dem Netz entnommenen elektrischen Energie. Das von dem Anker angetriebene Zählwerk gibt daher in der zeitlichen Summierung die während eines bestimmten Zeitabschnittes verbrauchte elektrische Arbeit an.

Wie bemerkt, ist jedoch hierfür unerläßliche Voraussetzung, daß die Größe der mechanischen Reibung völlig zu vernachlässigen ist. Dieselbe tritt hauptsächlich an drei Stellen auf, in den Achslagern, dem Zählwerk und am Kollektor, indem die vierte Art, die Luftreibung, bei der geringen Geschwindigkeit meist zu vernachlässigen ist. Da die Reibung vollständig überhaupt nicht zu beseitigen ist, so ist es naheliegend, ihre die Genauigkeit der Messung beeinträchtigende Wirkung durch eine genau gleiche Gegen-

kraft auszugleichen, die ihr namentlich bei schwacher Belastung das Gleichgewicht hält. Einmal ist die Reibung bei geringerer Geschwindigkeit größer, dann kommt sie naturgemäß um so mehr zur Wirkung und verschlechtert die prozentuale Genauigkeit des Zählers, je schwächer er belastet ist, je kleiner die zu messende Größe ist. Es wurde daher gleich zu Anfang bei der Einführung des THOMSON-Zählers zu ihrem Ausgleich eine mit dem Anker in Reihe geschaltete dünndrähtige Spule angewendet, welche in der Nähe der Starkstromwindungen angebracht das Feld derselben verstärkt. Je nach der Stärke des Nebenschlußstromes wird ihre Windungszahl und damit ihre magnetisierende Kraft so bemessen, daß bei normaler Spannung das von ihr erzeugte Feld gerade ausreicht, die im Ruhezustande vorhandene und sich dem Antrieb des Ankers widersetzende Reibung fast auszugleichen, d. h. bis auf einen ganz geringen Betrag. Die schwächste bei der Konstruktion des Zählers vorausgesehene Belastung, 1 bis 2 % der Maximalbelastung ist dann ausreichend, den Zähler unter allen Umständen zum Laufen zu bringen. Diese Reibungs-Kompensationsspule bildet bei fast allen Konstruktionen des THOMSON-Zählers das wesentlichste Mittel zum Ausgleich der Reibung. Wir werden im folgenden sehen, daß dies nur im beschränkten Maße zutrifft.

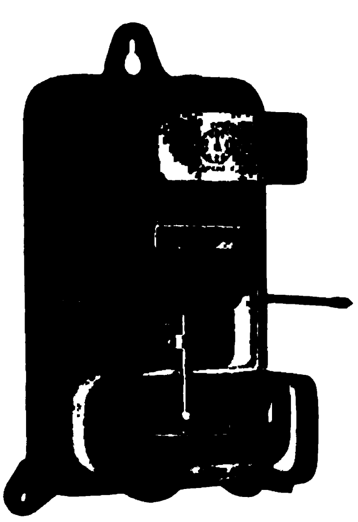


Fig. 51.

64. Beispiel des Thomson-zählers der General Electric Co.

Bevor jedoch nun auf diese wichtige Frage der Reibung, ihre Bedeutung und die zu ihrer Unschädlichmachung möglichen und angewandten Methoden, aus denen sich die verschiedenen Sonderkonstruktionen des THOMSON-Zählers ergeben, eingegangen werden soll, möge zum besseren Verständnis zuvor eine kurze Beschreibung der normalen Ausführung dieser wichtigen Zählertype folgen. Als Beispiel möge der von der General Electric Company U. S. fabrizierte Original-THOMSON-Zähler dienen, von dem in Fig. 51 die äußere Gesamtansicht bei abgehobenem Schutzdeckel, in Fig. 52 die Einzelteile, aus denen er besteht, wiedergegeben sind. Zur Aufhängung des Zählers und Befestigung der verschiedenen Teile dient die aus unmagnetischem Material gegossene Rückwand, welche mit 3 Ösen zur mechanischen Befestigung des Zählers versehen ist. Mittelst 4 eingegossener Vorsprünge wird an ihr das eigentliche Zählergestell, ein Gußkörper, ebenfalls aus unmagnetischem Material, angeschraubt, der zur Aufnahme der Lagerteile, des Zählwerks sowie der Dämpfermagnete dient. Der Anker ist auf einer hohlen Achse befestigt und besteht aus einem möglichst kugelförmig gewickelten Trommelanker, dessen einzelne Abteilungen mit einem winzigen nicht ganz 3 mm im Durchmesser habenden Kollektor mit silbernen Lamellen verbunden sind. Die an der Auflagestelle aus gleichem Material bestehenden dünnen Bürsten werden bei entsprechender mechanischer Befestigung mittelst regulierbarer Gegengewichte an den Stromwender angedrückt. Die auf der gleichen Achse im unteren Teile angebrachte Dämpferscheibe aus Aluminium bewegt sich in dem Felde mehrerer permanenter Magnete, die ebenfalls in besonders sorgfältiger Weise hergestellt sind. Das

untere Lager wird durch einen federnd nach oben gedrückten Saphir gebildet, auf dem sich der sorgfältig gehärtete und aus Klavierstahldraht hergestellte Lagerzapfen dreht. Derselbe ist in der hohlen Messingachse leicht auswechselbar angebracht und wird im praktischen Betriebe in bestimmten Zeiträumen laufend ausgewechselt, auch wenn er noch sehr wenig abgenutzt ist. Das obere Halslager besteht aus einem auf der Achse befestigten Stahlzapfen, der sich in einer entsprechenden Ausbohrung des oberen Lagers dreht. Die festen Spulen sind aus Façonkupfer zu einer kreisrunden Spule aufgewickelt, um so bei geringem Ohmschen Widerstande das stärkste



Fig. 52.

Feld zu erzeugen. Die so gebildete zweiteilige Starkstromwickelung ist dem Anker so nahe wie möglich gebracht, soweit es nur die mechanische Rücksicht auf das freie Spiel desselben zuläßt. Innerhalb der Starkstromspule ist die ebenfalls kreisrunde frei gewickelte Kompensationsspule an einem Messingstück drehbar befestigt angebracht, um hierdurch ihre Entfernung und damit die beschleunigende Wirkung auf den Anker regulieren zu können. Mittelst einer auf der Achse angebrachten Schnecke wird das Zählrad mit schleichenden Ziffern angetrieben.

65. Verschiedene praktische Ausführungsformen.

Diese einfache und als Normalkonstruktion zu bezeichnende Ausführung des Thomson-Zählers wird von einer großen Anzahl von Firmen mit nur geringen Abweichungen ebenfalls hergestellt. Es sind als solche zu nennen:

Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft, Berlin.
Siemens-Schuckertwerke G. m. b. H. Berlin.
Ketterer Söhne, Furtwangen.
Compagnie pour la fabrication des Compteurs et Matériel d'Usines à Gaz, Paris.
Duncan Electric Mfg. Co. Lafayette, U.S.
Diamond Meter Co., Peoria Illinois, U.S.

Eine bemerkenswerte Abweichung in der Ankerschaltung weisen die Zähler der

Isaria-Zähler-Werke G. m. b. H. München.
Hartmann & Braun A.G. Frankfurt/Main.
Mix & Genest, A.G. Berlin

auf, sind aber sonst vollkommen der THOMSON-Zählertype zuzurechnen.

Erheblich andere mechanische Konstruktion und teilweise auch geänderte elektrische Wirkungsweise ist in den Konstruktionen nachstehender Firmen enthalten, wobei die Verwendung von Eisen als charakteristisches Merkmal zu betrachten ist:

Felten & Guilleaume-Lahmeyer-Werke A.-G. Berlin.
John Busch, Elektrizitätszählerfabrik, Pinneberg.
Landis & Gyr, Zug (Schweiz).
Schiersteiner Metallwerk, G. m. b. H. Berlin.
Siemens & Halske, Berlin, in ihrem heute allerdings nicht mehr ausgeführten Flügel-Wattstundenzähler.
Chamberlain & Hookham, Birmingham.
Sangamo Electric Company, Springfield U.S.

Da jedoch das Meßprinzip dieser Apparate auf die im vorstehenden gegebene einfache Formel des THOMSON-Zählers zurückzuführen ist, so müssen auch diese Konstruktionen unbedingt dieser Zählergattung zugerechnet werden.

66. Große Bedeutung der Reibung. Das leitende Motiv bei all diesen verschiedenen Konstruktionen ist das Bestreben, den namentlich bei schwächerer Belastung so unliebsamen Einfluß der mechanischen Reibung nach Kräften zu vermindern oder gänzlich aufzuheben. Man kann offenbar in dieser Beziehung nach dreifacher Methode vorgehen.

Man wird in jedem Falle durch sorgfältige mechanische Ausführung und Konstruktion des Zählers die Größe der auftretenden Reibung nach Möglichkeit gering und in ihrer Größe konstant erhalten.

Da ihr Einfluß auf das Endresultat von dem Verhältnis ihrer Größe zu dem nutzbaren mechanischen Drehmoment, d. h. der Kraft des Zählmotors abhängt, so wird man auf der anderen Seite dieses Moment soweit nur irgend zulässig ist groß wählen.

Im Verein mit beiden Maßnahmen ist ihr schädlicher Einfluß durch das bereits angegebene Mittel einer Gegenkraft vollständig zu beseitigen. Der Natur der Sache nach kommt hierfür im wesentlichen ein das Feld der Hauptstromspulen verstärkendes zusätzliches magnetisches Feld, auf zweierlei Weise erzeugbar, in Frage.

67. Möglichste Verringerung der Reibung. Was die Reibung selbst anlangt, so ist einmal ihr absoluter Betrag möglichst gering zu halten, zweitens ihrer Veränderlichkeit, sowohl ihrer zeitlichen wie je nach der Ankergeschwindigkeit, nach Kräften entgegenzuwirken. Betreffs ihrer Komponenten wurde bereits erwähnt, daß sie in der Hauptsache an Kollektor und Bürsten entsteht, so zwar, daß dieser Teil der Reibung u. U. 10 bis 15 mal so groß ist, als die übrige in den Lagern und im Zählwerk. Nichtsdestoweniger ist es selbstverständliche Pflicht, bei Entwurf und Herstellung eines Motorzählers auch diese kleinere Reibung so gering wie möglich zu halten. Von größter Wichtigkeit ist hierbei das untere Spurlager, welches das Gewicht des ganzen Ankers samt Achse auf-

zunehmen hat. Man verwendet fast ausnahmslos hierfür Saphirpfannen, welche, in entsprechend hohlen Messinglagerschrauben untergebracht, federnd nach oben gedrückt werden. Damit dieses empfindliche untere Lager bei dem Transport nicht beschädigt wird, sind die Zähler sehr häufig mit Arretiervorrichtungen versehen, welche entweder durch ein Herunterschrauben dieses unteren Lagers den Anker mittelst eines zu diesem Zweck vorgesehenen Vorsprunges an seinem unteren Achsenende zum Aufliegen auf einem festen Stützpunkt bringen, so daß Saphirpfanne und Spurzapfen außer Berührung kommen. Oder aber es wird ebenfalls durch Drehung einer Schraube ein Messinghebel von geeigneter Gestalt gegen einen meist glockenförmig ausgebildeten Ansatz am unteren Achsenende angedrückt und hierdurch die Ankerachse von dem Spurlager abgehoben und in dieser Stellung festgelegt. Bei Zählern größerer Kapazität und daher auch höheren Preises verwenden neuerdings einige amerikanische Firmen sogar entsprechend hohl geschliffene Diamanten. Die Erhöhung des Anschaffungspreises soll bestimmt durch den sichereren Betrieb wettgemacht werden.

Von nicht minderer Bedeutung ist der Spurzapfen, als welchen man überall einen Stahlzapfen härtester Beschaffenheit, meist aus Klaviersaitendraht gefertigt, verwendet. Außer dem Material ist natürlich die Herstellungsart, namentlich auch der Neigungswinkel oder die Abrundung von großem Einfluß. Hierfür sind wohl bei jeder Fabrik die eigenen praktischen Erfahrungen maßgebend. Um bei irgend einer Verletzung dieses unteren Spurzapfens nicht die ganze Achse samt Armatur auswechseln zu müssen, werden neuerdings, wie schon bei dem Thomson-Zähler der General Electric Co. erwähnt wurde, besondere Spurzapfen in das untere Achsenende leicht auswechselbar eingesetzt. Die Duncan Electric Mfg. Co. hat zu diesem Zweck sogar eine Vorrichtung angebracht, welche selbst bei Betrieb des Zählers das untere Spurlager zu besichtigen und eventuell leicht den Stahlzapfen auszuwechseln gestattet.

Das obere lediglich der Führung der Ankerachse dienende Halslager erfordert naturgemäß nicht dieselbe peinliche Ausführung. Man bildet hier meistens das obere Achsenende als Lagerzapfen aus, der von einem entsprechend ausgeführten Halslager umfaßt wird. Dies Lager kann einfach, wie bei vielen Konstruktionen, aus einem Loch entsprechender Weite, direkt in Messing gebohrt, bestehen, auch kann in besserer Ausführung ein in Messing gefaßtes Steinloch hierzu dienen. In einer Reihe von Konstruktionen werden bei diesem oberen Lager die Rollen von Zapfen und Führungsloch derart miteinander vertauscht, daß in dem oberen Achsenende aus Messing ein in dasselbe gebohrtes zentrales Loch oder ein in diesem am oberen Ende gefaßtes Steinloch vorgesehen wird, welches in einem am oberen Lager angebrachten Stahlzapfen seine Führung findet. Es erleichtert dies die Auswechselung dieses Stahlzapfens, auch kann derselbe etwas länger und daher federnd genommen werden, was bei den unvermeidlichen Stößen, denen der Zähler beim Transport wie auch im praktischen Betriebe ausgesetzt ist, nur vorteilhaft auf die Lebensdauer und Güte dieses oberen Lagers einwirken kann.

Hinsichtlich gleichmäßiger und geringster Reibung sind allgemein die anfänglich ausschließlich verwendeten Zählwerke mit Zeigern oder schleichenden Ziffern vorzuziehen. Denn bei den neueren meistens durch Spritzguß hergestellten Rollenzählwerken mit springenden Ziffern ist an und für

sich die Reibung größer und kann beim Umschalten einer größeren Einheit, z. B. von 1000 Kilowattstunden, das hierbei erforderliche gleichzeitige Umschalten von 4 bis 5 Rollen leicht ein Stehenbleiben des Zählers, namentlich bei schwacher Belastung bewirken. Man beugt dem durch besondere Ausgleichsvorrichtungen vor. Doch ist bei den neueren Typen des THOMSON-Zählers das nutzbare Drehmoment so groß, daß auch die einfachen Rollenzählwerke mit genügender Sicherheit angewendet werden können und auch tatsächlich werden.

Die Reibung wird naturgemäß um so geringer ausfallen, je kleiner bei gleicher antreibender Kraft das Gewicht des beweglichen Systemes, d. h. hier des gesamten Ankers ist. Man verwendet zu diesem Zweck einmal häufig hohle Achsen, die die erforderliche mechanische Stabilität bei weit geringerem Gewicht ermöglichen als eine dünnere massive Achse. Der Anker selbst wird in denkbar leichtester Weise ausgeführt, meist auf einem sehr leichten Gestell von Fiber oder einem anderen leichten Isoliermaterial. Die Möglichkeit, anstelle von Kupferdraht den dünneren Aluminiumdraht zu verwenden, liegt zwar vor, kann aber aus anderen Rücksichten der Empfindlichkeit und des Platzbedarfes nicht ausgenutzt werden, da sich Aluminiumdrähte von so großer Feinheit, wie dies bei Kupferdrähten noch möglich ist, nicht mit gleicher Sicherheit herstellen lassen. Wohl ist aber diese Gewichtsersparnis an der Dämpferscheibe zu machen. Wenn manche Firmen aus Gründen von Temperaturdifferenzen bei der Kupferscheibe bleiben, um in der Dämpfung und der Ankerwickelung gleiches Material zu haben und daher den Zähler von der Temperatur möglichst unabhängig zu machen, so zeigt die Praxis, daß die in dieser Richtung zu fordernde mindeste Unabhängigkeit von Temperaturschwankungen nach beiden Methoden zu erzielen ist.

68. Ankerschaltung. Wesentlich in diesem Punkte des Gewichtes ist jedoch die Ankerschaltung und die noch besonders zu erörternde Anwendung von Eisen. Die Stromempfindlichkeit des Ankers ist eine verschiedene bei offener und geschlossener Ankerwickelung. Von dieser Erwägung ausgehend wird in dem Isariazähler, früher von den LUXschen Industriewerken hergestellt, anstelle der sonst üblichen geschlossenen Ankerwickelung eine offene dreiteilige, wie bei der älteren THOMSONschen Bogenlichtmaschine benutzt. Indem der Ankerstrom hier in dem einen Teile der Wickelung unverzweigt verläuft, wird die mittlere Stromempfindlichkeit 1,7 fach größer als bei Anordnung derselben Drahtmenge zu einer geschlossenen Trommelwickelung. Nimmt man daher anstelle dessen mit dieser durch eine geschlossene Wickelung erzielbaren Stromempfindlichkeit vorlieb, so kann man dafür mit dem 0,6 fachen Ankergewicht auskommen.

69. Die Reibung am Kollektor. Diese Vereinfachung der Wickelung führt jedoch zu einer weiteren Möglichkeit in dem Punkte der Reibungsverminderung. Es wurde bereits bemerkt, daß der weitaus größte Anteil der Reibung auf Kollektor und Bürsten entfällt. Offenkundig wird dieselbe um so größer ausfallen, je größeren Durchmesser der Stromwender besitzt. Dieser ist wiederum von der Anzahl der Ankerabteilungen abhängig. Mit je weniger Abteilungen man auskommen kann, um so kleiner kann der Kollektor ausgeführt werden. Ein bestimmtes Maß ist hierbei durch die mechanischen Rücksichten, namentlich aber durch die unbedingt nötige gute Isolation am Kollektor inne zu halten. Jedenfalls ergibt sich hierdurch für die offenen und mit weniger

Abteilungen versehenen Ankerwickelungen ein weiterer Vorzug. Von 5 bis 6 mm Durchmesser bei geschlossener Wickelung läßt sich der Durchmesser für die offenen auf 3, ja 2 mm und noch darunter reduzieren.

Dieser nicht unbeträchtliche Fortschritt wird allerdings durch das weitere ungünstige Moment der Veränderung der Reibung beeinträchtigt, wie sie durch die Funkenbildung und die dadurch bewirkte Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit bedingt ist. Wenn die Funkenbildung bei den geringfügigen hier in Betracht kommenden Stromstärken auch absolut genommen nur eine äußerst winzige sein kann, so ist sie andererseits bei den geringen wirksamen Kräften relativ stark genug, bedeutsame und für das Endresultat durchaus nicht zu vernachlässigende Wirkungen hervorzurufen. Nach dieser Richtung besitzt ein Anker mit geschlossener mehrteiliger Wickelung entschiedene Vorzüge. Denn genau wie bei den elektrischen Maschinen größerer Leistung wird die Funkenbildung in erster Linie durch eine möglichste Unterteilung der Wickelung hintangehalten. Man ist daher gezwungen, bei diesen nur wenige Abteilungen aufweisenden offenen Ankerwickelungen besondere Mittel zur Verhütung bzw. Verminderung der Funkenbildung anzuwenden. Diese bestehen einmal in Nebenschlußwiderständen, die teils auf dem Anker selbst, teils parallel zu den festen Bürsten angeordnet werden. Bei dem Isariazähler kommen auf dem Anker selbst angebrachte Kurzschlußwindungen hierfür in Anwendung.

Außer dieser durch die Funkenbildung bewirkten Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit der Stromwenderlamellen kommt natürlich weiterhin eine solche durch andere äußere Einflüsse wie Staub, atmosphärische Einflüsse, Ausdünstungen irgendwelcher Art ebenfalls in Frage. Von dem ursprünglich angewendeten Kupfer ging man bald zur Benutzung besonderer Broncelegierungen, wobei jede Fabrik wieder ihre Spezialerfahrungen benutzte, über. Auch sind besondere Verfahren angewendet worden, um die Kollektoroberfläche durch chemische Behandlung gegen solche Einflüsse möglichst widerstandsfähig zu machen. In neuerer Zeit gibt man allgemein der Verwendung von Edelmetallen den Vorzug. Silber ist hier infolge seines relativ niedrigen Preises, sodann wegen der weiteren Eigenschaften, daß das sich bildende Silberoxyd gut leitet, besonders vorteilhaft.

Für die Bürsten wird das gleiche Material, sehr oft in Form von hochkant gestellten Blechen angewendet, welche durch besondere federnde Bürstenträger mit regelbarem Druck an den Stromwender angedrückt werden. Die Bürsten werden hierbei in Massenfabrikation nicht nur in mechanisch durchaus gleichmäßer Form hergestellt, sondern häufig noch an einem geeigneten Dynamometer auf genau gleichen Auflagedruck abgeglichen. Es kann so im Bedarfsfalle eine Bürste auch von weniger geübter Hand durch eine andere leicht ausgetauscht werden, indem die Ersatzbürste durch einfaches Einklemmen in den ein für allemal fest angeordnetem Bürstenhalter automatisch mit genau gleichem Druck zum Anliegen an den Kollektor gebracht wird. Ebenso häufig werden auch feine Drähte des gleichen Materials, oft noch vergoldet, hierzu benutzt. In jedem Falle wird eine aus mehreren solchen Blechstreifen oder Drähten zusammengesetzte Bürste verwendet, um die Sicherheit der Stromzuführung zu erhöhen.

Bei der Konstruktion und Ausführung des Kollektors, dieses für die Genauigkeit und Betriebssicherheit des Elektrizitätszählers so überaus wichtigen Teiles, ist natürlich auch der Kostenpunkt von hoher Bedeutung.

Während man früher durchweg sehr subtile und mit Präzisionsmaschinen hergestellte Stromwender, die sich natürlich auch entsprechend teuer stellten, verwendete, hat die fortschreitende Technik hier bedeutsame Vereinfachungen gezeitigt, ohne die anderen Bedingungen hierbei zu vernachlässigen. So stellt man vielfach den Kollektor aus gitter- oder käfigartig angeordneten Silberdrähten her, welche untereinander, außer an ihren Befestigungsstellen aus Fiber oder ähnlichen Materialien, sonst nur durch Luft isoliert sind. Hierdurch entstehen notwendigerweise um so mehr, je weniger Abteilungen vorhanden sind, bei schnellerer Gangart des Ankers Schwingungen der Bürsten, die eine besonders starkfedernde Anordnung derselben nötig machen.

70. Möglichst großes nutzbares Drehmoment. Nicht minder wichtig wie vorstehend wiedergegebene Bestrebungen zur möglichsten Verringerung der Reibung sind die weiteren auf eine Erhöhung des nutzbaren Drehmomentes gerichteten. Der schon bei den elektrodynamischen Meßinstrumenten stark empfundene Nachteil der geringen wirksamen Kraft tritt hier in verstärktem Maße auf, da es sich nicht nur um die möglichst sichere Einstellung eines Zeigers, sondern um die Leistung nicht unerheblicher mechanischer Arbeit handelt. Der nächstliegende Gedanke, die an und für sich schwachen elektrodynamischen Kräfte eisenloser Stromspulen durch eine entsprechende Erhöhung der Windungszahlen auszugleichen, findet praktisch sehr enge Grenzen nach zwei Richtungen. Zunächst wächst hierdurch der Eigenverbrauch des Zählers im gleichen Verhältnis, und ist bereits bei den Amperestundenzählern ausgeführt worden, inwiefern dieser Punkt, wenn auch nicht immer ausschlaggebend, so doch von großer praktischer Bedeutung ist. Sodann kommt namentlich für eine Erhöhung der Windungszahlen des Ankers die hierdurch eintretende Gewichtsvermehrung zu unerwünschter Wirkung, hebt also das zu erreichende Ziel zum Teil wieder auf.

Aus diesen Gründen ist die verlockende Aussicht, durch Anwendung von Eisen stärkere Zugkräfte zu erzielen, noch heute ein Gegenstand lebhafter Erörterungen, wenn auch die Ansichten hierüber sehr geteilt sind. Der unbestreitbare Vorzug des eisenlosen Wattmeters, die genaueste Energiemessung sowohl bei Gleich- wie Wechselstrom zu liefern, ist verschiedenen Firmen und Konstrukteuren wichtig genug erschienen, von dem Gesichtspunkte der größtmöglichen Genauigkeit ausgehend die Verwendung von Eisen hierbei vollkommen auszuschließen oder doch nur in ganz geringem Maße zuzulassen.

Sieht man von der Verwendung des verstärkenden Eisens ab, so ist die nächste Forderung, mit den zur Verfügung stehenden Windungen, sowie innerhalb der hinsichtlich des Eigenverbrauches zulässigen Grenzen die günstigste elektrodynamische Wirkung zu erzielen. Diese hängt bekanntlich außer von der Form der aufeinander wirkenden Stromleiter von ihrer Entfernung und der Stärke des sie durchfließenden Stromes ab. Von den verschiedenen geometrischen Formen übt der Kreis bei geringstem elektrischen Widerstande die größte magnetische Kraft aus. Man findet daher bei vielen Konstruktionen den kugelförmigen Anker, mindestens aber kreisförmige Gestalt der einzelnen Ankerwickelungen. Aus konstruktiven Rücksichten bedienen sich andere Fabrikate der ovalen Form, auch mit im wirksamen Felde gerade verlaufenden Ankerleitungen. Die festen Spulen werden der Form des Ankers entsprechend ebenfalls kreisförmig oder oval ausgeführt und umschließen den Anker zu beiden Seiten der Achse möglichst nah, soweit es eben das mechanisch freie Spiel desselben zuläßt. Bei Konstruktionen

für niedere Stromstärken ersetzt man oft die zu beiden Seiten der Ankerachse gleichmäßig verteilten Starkstromspulen durch eine einzige, meistens an der Rückwand des Zählers angeordnete Starkstromspule. Die hierdurch etwas geringere elektrodynamische Wirkung findet ihren Ersatz in der bequemeren Montage und größeren Zugänglichkeit der einzelnen Teile. Von kleineren Stromstärken abgesehen, werden die Starkstromspulen meist aus Façonkupfer oder Band mit entsprechender isolierender Zwischenlage aufgewickelt, um auch so zur günstigsten Raumausnützung bei großer magnetischer Wirkung zu gelangen.

Am wirksamsten ist in dieser Richtung, Erhöhung der elektrodynamischen Kraft, die Einführung offener Ankerwickelungen, wie dies bereits bei Besprechung der Gewichtsverhältnisse an dem Isariazähler bemerkt wurde. Die 3 Spulen dieses Zählers sind mit einem dreiteiligen Kollektor verbunden und sind symmetrisch zur Achse angeordnet, d. h. jede Spule liegt zu beiden Seiten der Ankerachse an. Statt der dreiteiligen Wickelung wird in dem Zähler von Mix & Genest A.-G. ein solcher mit zweiteiliger Wickelung und vierteiligem Kollektor angewendet. Der Funkenbildung ist durch Verwendung einer durch hohen Widerstand in sich verbundenen Doppelbürste vorgebeugt.

Tritt bei diesen Wickelungen in den einzelnen Ankerwickelungen hintereinander die volle und halbe Stärke des Nebenschlußstromes auf, so wird eine solche Parallelschaltung bei nur einfacher Ankerwickelung mit zwei Stromwenderlamellen offenbar ganz vermieden. Diese Konstruktion wurde von der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft ausgeführt. Man erreicht hierdurch allerdings einen sehr geringen Verbrauch im Ankerstromkreis, muß aber zur Überwindung des hierbei an 2 Stellen einer Ankerumdrehung auftretenden toten Punktes besondere Hilfsvorrichtungen einführen, die die Konstruktion komplizieren.

Eine ebenfalls dreiteilige Ankerwickelung von eigentümlicher Schaltung, die zwischen der geschlossenen und offenen liegt, verwenden Hartmann & Braun A.-G., wie im Späteren gezeigt wird.

71. Verwendung von Eisen.

Hiermit sind so ziemlich die Möglichkeiten erschöpft, bei einem eisenlosen Wattstundenzähler die Empfindlichkeit zu erhöhen. Es bleibt also nur noch die Einführung des allerdings sehr verstärkenden Eisens möglich, welche jedoch dem Zähler seine Eigenschaft als genaues Wattmeter nimmt und seine Verwendung auf bestimmte Meßbereiche beschränkt. Hierbei steht die Wahl offen, Eisen zur Verstärkung des Hauptstromfeldes oder des Spannungsfeldes zu verwenden. Von vornherein erscheint aus den bekannten Rücksichten auf die in der Magnetisierungskurve des Eisens zum Ausdruck kommenden Unregelmäßigkeiten infolge der Hysteresis und der bekannten Unproportionalität zwischen magnetisierender Kraft und erzeugtem Felde die Anwendung von Eisen in den Hauptstromspulen ausgeschlossen, da ja das von diesen erzeugte Feld von der geringsten Belastung bis zur höchst zulässigen Überlastung möglichst genaue Proportionalität zwischen Stromstärke und erzeugtem Feld aufweisen soll. Es sind jedoch von J. Busch, Pinneberg, Mittel und Methoden bekannt gegeben, und die wichtigste davon auch in seinem in folgendem beschriebenen Zähler praktisch angewendet worden, welche diese unliebsamen Störungen der Proportionalität auf ein praktisch zulässiges Maß herabdrücken sollen, um dann die sehr erwünschte verstärkende Wirkung des Eisens auszunutzen.

Weit eher ist das Eisen im Spannungssystem zulässig, da hierbei die praktisch sehr begrenzten Schwankungen dieser Größe den mittleren geraden Teil der Magnetisierungskurve auszunutzen gestatten, und die periodische Stromumkehr im Anker die Hysteresiswirkung in ungezwungener Weise unschädlich macht, wie dies bereits in der historischen Entwickelung ausführlich erläutert ist. Es ist hier des neuen Wattstundenzählers der FELTEN & GUILLEAUME-LAHMEYER-Werke A.-G. Berlin zu gedenken, bei dem anstelle des Trommelankers der regulären THOMSON-Type ein auf einem dünnen Eisenkern gewickelter Grammering verwendet wird. Die hierdurch bewirkte stärkere Abhängigkeit des Ankers von dem Erdfelde wird durch einen solchen Doppelanker in astatischer Schaltung samt zugehörigem Doppelhauptstromfelde ausgeglichen. Ein sehr einfacher und leichter dreiteiliger Anker, auf einem gleichartigen dreiteiligen Eisenblechstern aufgewickelt, wird neuerdings von dem Schiersteiner Metallwerk G. m. b. H. Berlin verwendet. Die äußere mechanische Ausführung des THOMSON-Zählers wird erheblich mehr verlassen in dem Flügel-Wattstundenzähler von SIEMENS & HALSKE A.-G. Berlin, sowie dem bisherigen Veritas-Wattstundenzähler des Schiersteiner Metallwerkes. Beide Konstruktionen werden allerdings in neuester Zeit von beiden Firmen nicht mehr ausgeführt.

73. Unipolarzähler. Noch mehr unterschieden in äußerer mechanischer Ausführung sowie in der elektrischen Schaltung sind die Unipolarzähler von CHAMBERLAIN & HOOKHAM, sowie von der SANGAMO Electric Co. U. S. Die Schaltung dieser Apparate weicht insofern grundsätzlich von dem THOMSON-Zähler ab, als zufolge dem angewendeten Meßprinzip kein Stromwender existiert, und statt dessen der Starkstrom eine Kupferscheibe mittels zweier Quecksilberkontaktschichten durchfließt. Der hierdurch auftretende Einfluß der Hysteresis, die nicht mehr durch die periodische Stromumkehr beseitigt werden kann, wird in dem englischen Zähler dadurch unschädlich gemacht, daß der Eisenkörper des durch den Nebenschlußstrom erregten magnetischen Feldes aus aufeinander geschichteten Eisenscheiben mit starker gegenseitig entmagnetisierender Wirkung gebildet wird. Bei dem SANGAMO-Zähler ist weiterhin bemerkenswert, daß der Apparat in verschiedener Schaltung für Gleichstrom und Wechselstrom benutzt werden soll, wobei man infolge der Abwesenheit eines Stromwenders dieser Konstruktion sogar wesentliche Vorzüge vor den Induktionsmotorzählern nachrühmt.

73. Kompensation der Reibung. Bei allen Konstruktionen kommen außerdem besondere Mittel zur Anwendung, um der in jedem Falle vorhandenen mechanischen Reibung durch eine entgegenwirkende Kraft das Gleichgewicht zu halten. Das wichtigste und hierfür allgemein benutzte Mittel wurde bereits in Form der Reibungskompensationsspule bei dem Zähler der General Electric Co. beschrieben. Seine Anwendung ist aber durchaus nicht unbedenklich, als das so auch bei ausgeschaltetem Hauptstrom vorhandene magnetische Feld dieser Hilfsspule den Zähler namentlich bei Überspannung leicht zum Leerlauf bringen kann. Je empfindlicher der Zähler bei dem kleinsten Strom des angeschlossenen Netzes sein soll, um so leichter kann dieser Fall eintreten. Es werden daher besondere Vorkehrungen nötig, um dies stromlose Laufen des Apparates selbst bei beträchtlichen Überspannungen sicher zu verhüten. Man verwendet meistens hierzu ein kleines Eisenstückchen aus Draht oder Blech, das an der Dämpferscheibe angebracht durch die Dämpfungsmagnete bei

ausgeschaltetem Hauptstrom in einer bestimmten Lage festgehalten wird. Stärke und Anordnung dieses Eisenhäkchens werden so gewählt, daß der Zähler erst bei $^1/_2$ bis 1 $^0/_0$ der Maximalbelastung die anziehende Wirkung der Dämpfermagnete auf dieses Eisenstückchen mit Sicherheit überwindet und zu registrieren anfängt. Selbstredend ist diese ziemlich primitive Anordnung nur ein äußerst unvollkommner Notbehelf, trotzdem sie noch heute in allgemeiner Anwendung steht.

Den weiteren Übelstand bei dieser Kompensation der Reibung durch eine gleichmäßige Gegenkraft, daß nämlich die Reibung bei langsamem Lauf stärker ausfällt als bei schnellerem, hat man durch allerhand Kombinationen von Wickelungen und Magnetfeldern zu beheben versucht, ohne jedoch hierdurch zu einem bemerkenswerten weiteren Fortschritt gelangt zu sein.

Außer einer Zusatzspule, vom Ankerstrom erregt, hat man teilweise zu diesem Zweck auch das Streufeld der entsprechend angeordneten Dämpfermagnete benutzt.

In den meisten Konstruktionen bringt man dagegen zwischen Dämpfung und Zählmotor möglichst großen Zwischenraum, um die Dämpfungsmagnete nach Kräften der magnetisierenden Einwirkung der Starkstromspule zu entziehen. Denn bei den im vorstehenden dargelegten Beziehungen zwischen Dämpfung und nutzbarem Drehmoment des Zählmotors ist eine entsprechende Ausführung und namentlich zeitliche Konstanz der Intensität dieser permanenten Magnete auf die Genauigkeit der Messung von sehr erheblichem Einfluß. Die Herstellung dieser Magnete und ihre besondere Behandlung ist bei allen Zählern ein Punkt größter Bedeutung und hat daher fast jede Fabrik ihre eigenen Erfahrungen hinsichtlich Material, Form und besonderer Behandlungsweise dieser Magnete. Die Dämpfungsscheibe wird aus den bereits angegebenen Gründen des Gewichts, sowie des gleichen Temperaturkoeffizienten bald aus Aluminium, bald aus Kupfer hergestellt.

74. Allgemeiner Aufbau.

Was allgemein den mechanischen Aufbau der Zähler dieser Thomson-Type anlangt, so werden die Einzelteile meistens auf einer mit entsprechenden Aussparungen und Vorsprüngen versehenen Gußplatte aus irgend einem unmagnetischen Material, wie Zink, Bronce u. dgl. befestigt, die gleichzeitig der Aufhängung und Befestigung des Zählers dient. Die Anschlüsse werden, von ganz großen Stromstärken abgesehen, von unten her in den Zähler eingeführt und ist darauf zu achten, besonders bei höheren Stromstärken, daß diese Zuleitungen keine unerwünschte Einwirkung auf den beweglichen Anker ausüben. Bei sehr hohen Stromstärken kommen massive, meist gegossene Kupferleiter mit rückwärtiger Zu- und Ableitung des Stromes zur Anwendung, Die Stromzuleitungsklemmen sind meistens in einem entsprechenden Gußkörper aus isolierendem Material, in der Regel Porzellan, eingebettet und werden nach erfolgter Einführung durch eine besondere Kappe nach außen abgeschlossen und gegen Berührung geschützt. In der Rückwand ist eine Nut vorgesehen, in die die den Zähler mechanisch abschließende Schutzkappe hineinpaßt. Bei vielen Konstruktionen ist das untere Spurlager und hiermit gleichzeitig, sonst auch getrennt hiervon, der Kollektor samt Bürsten durch eine besondere Kappe zugänglich, ohne die vor Versendung des Zählers angebrachte Plombierung der Schutzkappe zerstören zu müssen.

Praktische Ausführungsformen.

75. Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft.

Der THOMSON-Zähler wurde in Deutschland zuerst von der Union-Elektrizitätsgesellschaft, Berlin, auf den Markt gebracht und wird heute nach Verschmelzung dieser Firma mit der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft, Berlin, von letzterer in einer von der ursprünglichen nur in verschiedenen Einzelheiten abweichenden Form hergestellt und vertrieben. Fig. 53 und 54 stellen diese neuere Ausführungsform, Form *L K* für kleinere

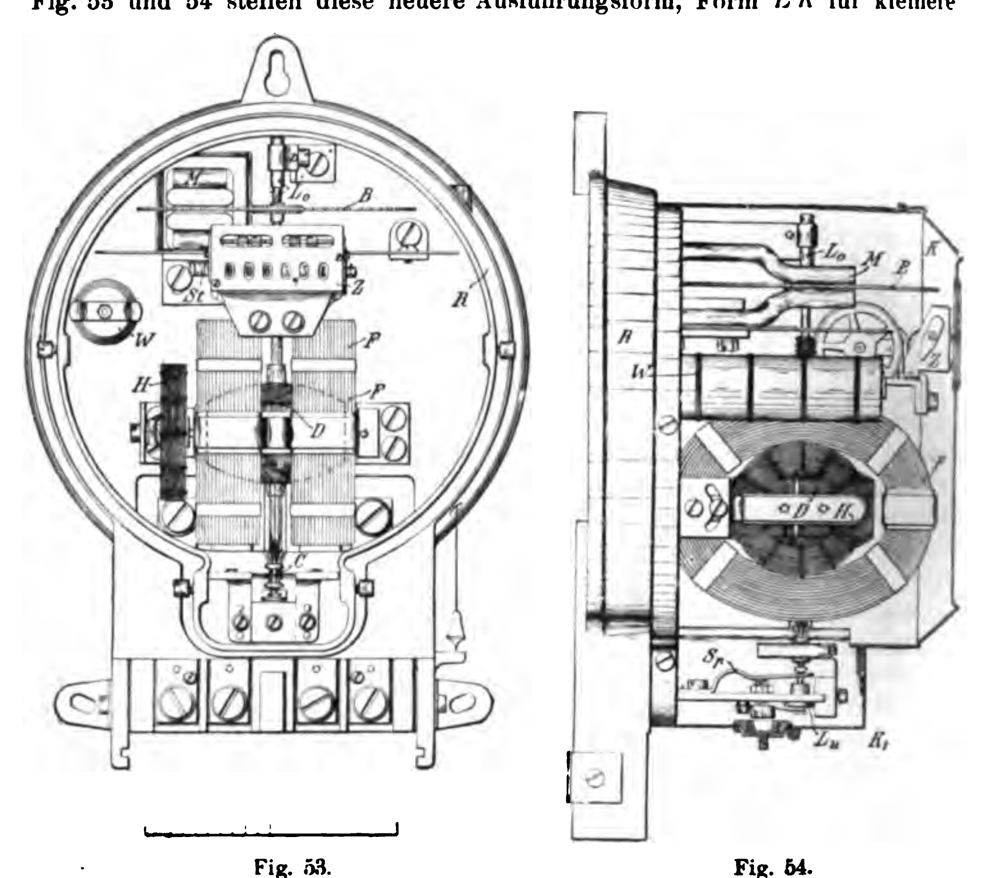


Fig. 53. Fig. 54.

Stromstärken, dar und sind die wesentlichsten Bestandteile, wie Starkstromspulen *F*, Anker *D*, Hilfsspule *H*, Kollektor *C* und Bremsscheibe *B* mit Dämpfungsmagneten *M* leicht zu erkennen. Alle Teile sind auf der gemeinsamen Rückplatte aus Zinkguß montiert, welche nach dem angebrachten Lot, wie aus Fig. 53 zu erkennen ist, senkrecht an einer geeigneten Wand montiert wird. Eine untere Kappe K_1 ist getrennt von der Gehäusekappe *K* abnehmbar, um hierdurch das untere Kugellager und Bürsten samt Kollektor zugänglich zu machen. Der Eigenverbrauch im Nebenschluß beträgt 1·3 bis 1·4 Watt. Die je aus 2 Silberblechstreifen ausgeführten und durch ein Stahldrähtchen an den Stromwender angedrückten Bürsten sind gegeneinander versetzt, um jede auf dem Kollektor ihre eigene Bahn beschreiben zu lassen. Das Zahlenwerk, wie üblich mit springenden Ziffern ausgerüstet, zeigt die durchgeflossene Energie direkt in Wattstunden an. Der Zähler wird mechanisch entsprechend den verschiedenen Stromstärken mit verschiedenen Ab-

änderungen hergestellt, ohne irgendeine wesentliche Änderung in Prinzip und Schaltung.

So stellt Fig. 55 die Form *M* des THOMSON-Zählers der A.E.G. dar, die für Stromstärken von 150 bis 1000 Amp. hergestellt und hauptsächlich für Schalttafeln benutzt wird. Ganz besondere Sorgfalt ist auf die Ausführung des unteren Spurlagers gelegt, welches allen Konstruktionen der Firma gemeinsam ist. Der untere, 1 mm starke Stahlzapfen der Ankerachse ist zu diesem Zwecke hohl geschliffen und rotiert unter Vermittelung einer ca. 0·8 mm Durchmesser besitzenden Stahlkugel auf dem in einer Ölkammer befindlichen Saphirstein. Der etwas magnetisierte Zapfen hält so die Stahlkugel durch Anziehung fest, wenn man ihn aus der Ölkammer zwecks Revision herausnimmt. Die den Lagerstein tragende Ölkammer ist dreiteilig in sauberem

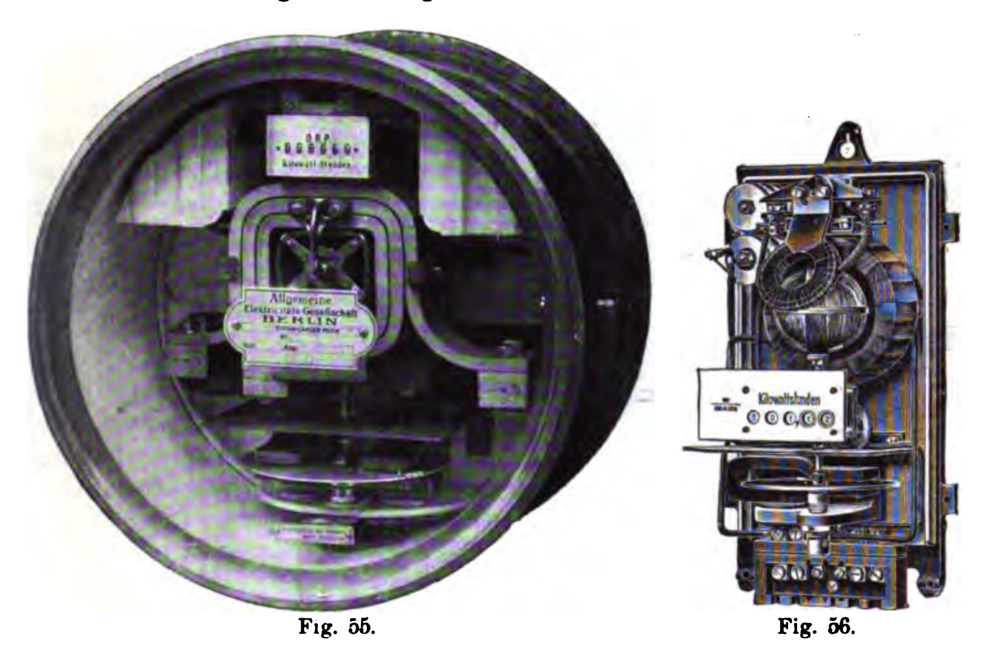


Fig. 55. Fig. 56.

Spritzguß ausgeführt und besteht aus dem walzenförmigen Hauptgefäß, das mit schwacher Reibung in die untere Lagerfassung eingeschoben und in derselben durch eine Feder nach oben gedrückt wird, dem dreiarmigen Führungsstück in derselben, das zwecks Durchlaß des Zapfens mit 1·5 mm starkem Loch versehen ist, und dem mit 2 mm starken Loch versehenen Deckel. Der Lagerstein ist mit einer zylindrischen Fassung in ein 3 mm weites Loch der Ölkammer eingelassen. Derselbe kann zufolge der federnden Anordnung der Ölkammer irgendwelchen Stößen beim Transport und während des Betriebes nachgeben, und wird daher neuerdings der Zähler sogar ohne Arretierungsvorrichtung ausgeführt und versandt.

In neuerer Zeit wird auch das obere Lager als Öllager ausgeführt.

Derselben Firma ist auch ein THOMSON-Zähler mit Einspulanker geschützt, und ist diese Konstruktion auch zur amtlichen Beglaubigung zugelassen. Der hierbei während einer Umdrehung zweimal auftretende tote Punkt wird durch entsprechende magnetische Ausgleichsvorrichtungen in Verbindung mit an passender Stelle der Bremsscheibe angebrachten Aussparungen ausgeglichen. Der hierdurch tatsächlich sehr herabgedrückte

Nebenschlußverbrauch scheint aber kein genügendes Äquivalent gegen diese durch den toten Punkt notwendig gewordenen Ausgleichsvorrichtungen zu bieten, so daß diese Konstruktion nicht mehr praktisch ausgeführt wird.

76. Siemens-Schuckert Werke.

Eine gleichfalls dem ursprünglichen THOMSON-Zähler sehr nahekommende Konstruktion wurde seit langer Zeit von der Elektrizitäts-A.-G. vorm. SCHUCKERT & Co. in den Verkehr gebracht und heute von den SIEMENS-SCHUCKERT Werken, G. m. b. H., Berlin, in ebenfalls nur in den Einzelheiten abweichender Form weiter fabriziert und vertrieben. Fig. 56 zeigt die Ausführung für niedere Stromstärken zwischen 3 bis 20 Amp. Die einseitige Starkstromspule gestattet eine bequeme Montage der übrigen Zählerteile und bietet reichlichen Raum für die Fixierung der Reibungskompensationsspule. Der kugelförmige Anker ist mit seinen 8 Abteilungen an einen Kollektor von gleicher Lamellenzahl geführt, welchem der Strom durch federnd justierbare Silberbürsten zugeführt wird. Auch hier ist das untere Spurlager in ebenso dauerhafter wie für Revision und Auswechselung sehr geeigneter Weise konstruiert. Dasselbe kann mittelst weniger Handgriffe aus dem Zähler herausgenommen werden, wodurch gleichzeitig der untere Lagerzapfen und das Saphirlager zugänglich und auswechselbar werden. Das Zählwerk besitzt springende Ziffern, aber in Form von Zahlenscheiben, mit besonderer Ausgleichsvorrichtung. Für höhere Stromstärken kommt eine abgeänderte Konstruktion mit doppelteiligem Starkstromsystem und parallel zu demselben angeordneter Hilfswickelung zur Ausführung. Für sehr große Stromstärken kommen massive Kupferleiter zur Benutzung. und wird der ganze Zählerkreis rund nach der Art eines Schalttafel-Meßinstrumentes ausgeführt, s. Fig. 57. Diese Type *GW* wird außer für Gleichstrom auch für Wechselstrommessung bei niederer Periodenzahl benutzt.



Fig. 57.

Neuerdings ist die Konstruktion durch Adoptierung der dreiteiligen Ankerwickelung vereinfacht worden, wobei Kollektor und oberes Halslager leicht auswechselbar gemacht sind. Zu diesem Zwecke sind die drei Enden der Ankerwickelung zu federnden Kontakten ausgebildet, gegen die sich drei entsprechend ausgebildete Bleche als Enden der drei Kollektorsegmente ebenfalls federnd anlegen. Arretiert man das untere Spurlager, so kann man den dreiteiligen Stromwender mit oberem Halslager nach Lösung des oberen Lagerstückes bequem von der Achse abziehen, reinigen und wenn nötig gegen einen neuen Kollektor samt Halslager austauschen.

Die Firma KETTERER Söhne, Furtwangen, stellt ebenfalls einen THOMSON-Zähler normaler Konstruktion her, bei welchem die Starkstromspule schräg zur Achse und Anker geordnet ist.

77. Duncan El. Mfg. Co.

Von den amerikanischen Konstruktionen hat nächst der bereits beschriebenen der General Electric Co. der von der Firma DUNCAN Electric Mfg. Co. hergestellte Zähler große praktische Verbreitung ge-

funden. Diese Firma baut als Spezialität den Thomson-Gleichstromzähler für alle Stromstärken von 2·5 bis 6000 Amp. Sämtliche Teile sind auf einem besonderen Trägergestell montiert, so daß ein Verziehen der Grundplatte ohne Einfluß auf das genaue Arbeiten des Zählmotors bleibt. Die Reibungs-

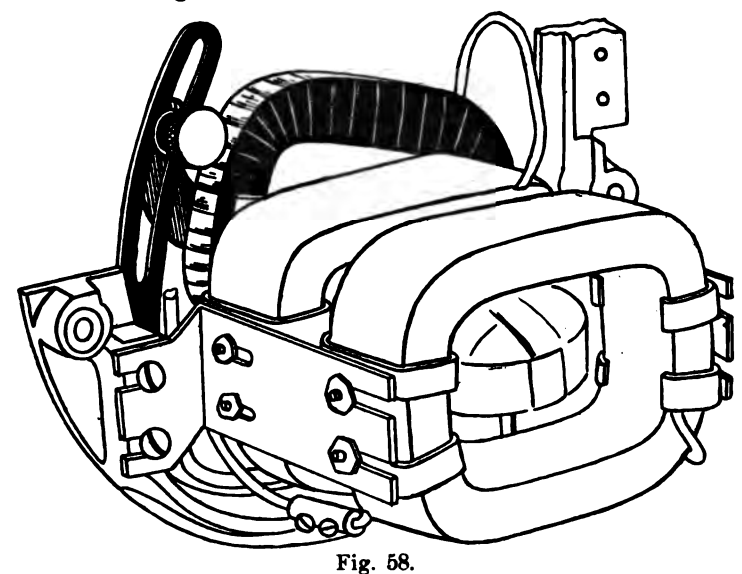


Fig. 58.

kompensationsspule ist mit einem Regulierwiderstand, mit Kurbel und Kontaktknöpfen ausgerüstet, hintereinander geschaltet, und können so nachträgliche Änderungen der Reibung in ihrem Einfluß auf die Zählerangaben bequem ausgeglichen werden. Der Anker ist nach der gewöhnlichen Trommelwickelung hergestellt und erhält den Strom durch federnd angeordnete Bürsten zugeführt, die auf von Temperaturdifferenzen unabhängigen Lavaträgern angeordnet sind. Das untere Spurlager ist, wie bereits erwähnt, während des Betriebes zu revidieren, ist gewöhnlich mit einem Saphirstein, für höhere Stromstärken auf Wunsch mit einem Diamantlagerstein ausgerüstet.

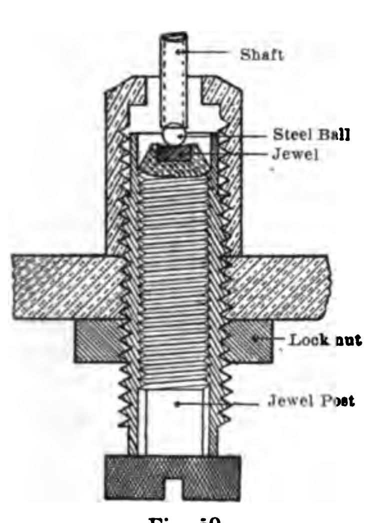


Fig. 59.

78. Diamond Meter Co.

Die Diamond Meter Company fabriziert den Scheefer Integrating Watt Meter. Ursprünglich mit einem scheibenförmigen Spulenanker und demgemäß geformten Starkstromspulen ausgerüstet, ist die Gesellschaft in den letzten Jahren zu der normalen Ausführung des Thomson-Zählers übergegangen. Die Reibungskompensationsspule ist, wie aus Fig. 58 ersichtlich, parallel zur Achse in einem Schlitz verschiebbar, um so ihren Einfluß auf den drehbaren Anker und damit die Reibungskompensation zu regeln. Das untere Spurlager besitzt ähnlich der A.E.G.-Lagerkonstruktion einen Saphirlagerstein, auf dem sich als Übertragungsglied zu der Achse eine polierte Stahlkugel dreht, siehe Fig. 59.

In der Ankerschaltung weichen nicht unwesentlich von dem normalen THOMSON-Zähler die Konstruktionen der folgenden Firmen ab.

79. Isaria-Zähler Werke.

Der Isaria-Wattstundenzähler, von dem Fig. 60 die Ausführung für größere Stromstärken für 100 bis 500 Amp., Modell A.R., darstellt, besitzt einen Anker mit drei kreisförmig bzw. oval gewickelten Schwachstromspulen, die in offener Schaltung mit dem dreiteiligen, sehr geringe Dimensionen aufweisenden Kollektor verbunden sind. Es wurde bereits der Vorzüge dieser Konstruktion im vorstehenden gedacht, indem man entweder bei gleichem

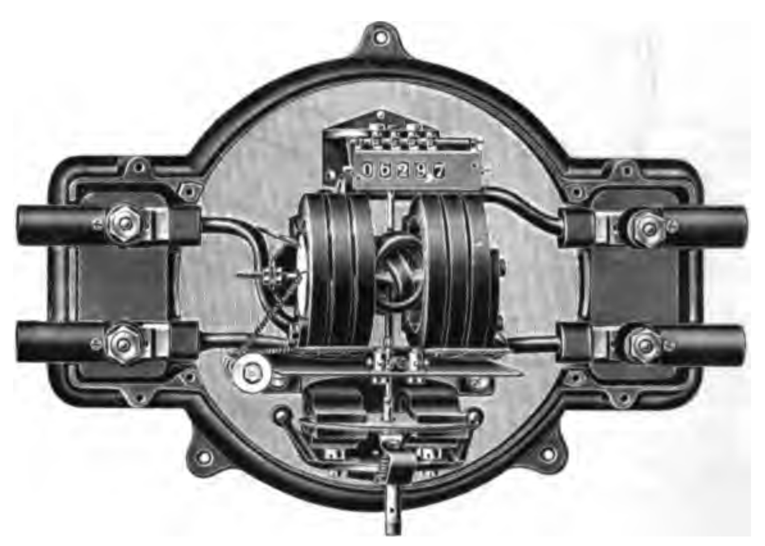


Fig. 60.

Kupfergewicht des Ankers die 1·7 fache Empfindlichkeit eines mit gewöhnlicher Trommelwickelung versehenen Ankers erzielen oder bei gleicher Empfindlichkeit das Gewicht auf den 0·6 fachen Betrag vermindern kann. Es sind als weitere Vorzüge dieser Anordnung hervorzuheben die vermehrte Betriebssicherheit, indem die vielfachen Verbindungen der Ankerabteilungen mit dem Kollektor bei anderen Konstruktionen im Verhältnis von 14—16 : 3 herabgemindert sind. Sodann ist der dreiteilige Kollektor mit sehr viel kleinerem Durchmesser herzustellen. Dagegen machen die durch diese Konstruktion hervorgerufenen Schwankungen der Ankerstromstärke und die hierdurch begünstigte Funkenbildung besondere Vorrichtungen zur Verminderung letzteren Übelstandes nötig. Die Kompensationsspule liegt innerhalb einer Starkstromspule. Der Zähler wird für die verschiedensten Stromstärken und Verwendungsarten ausgeführt.

80. Hartmann & Braun A.-G.

Eine ebenfalls dreiteilige Ankerwickelung, aber in geschlossener Schaltung, besitzt der Wattstundenzähler der HARTMANN & BRAUN A.-G., Frankfurt a. M. Wie aus der in Fig. 61 wiedergegebenen Schaltung des Zählerankers hervorgeht, sind die Enden jeder der drei Spulen einerseits mit je einem Segment des dreiteiligen Stromwenders, andererseits mit einem auf der Achse isoliert aufgesetzten Metallring verbunden. Die drei Kollektorsegmente sind schließlich über je einen Vorschaltwiderstand W_1 W_2 W_3 mit einem auf der Achse unisoliert aufgesetzten Metallring verbunden. Eine leicht federnde Bürste schleift auf dem oberen Achsende, eine zweite Bürste

auf dem dreiteiligen Stromwender. Die wirksamen Spulen sind so gewickelt, daß ihre Windungen vom Kollektor aus in gleichem Sinne verlaufen, und werden vom Strom so durchflossen, daß immer zwei derselben gleiche Polarität, die dritte aber, durch welche ein doppelt so starker Strom fließt wie in den beiden anderen, eine jener entgegengesetzte erhält. Die Stromempfindlichkeit des Ankers ist umso größer, je größer der Widerstand von W_1 W_2 W_3 im Vergleich zu den Ankerspulen ist. Praktisch kommt man dem Maximum der Wirkung schon sehr nahe mit Vorschaltwiderständen, welche

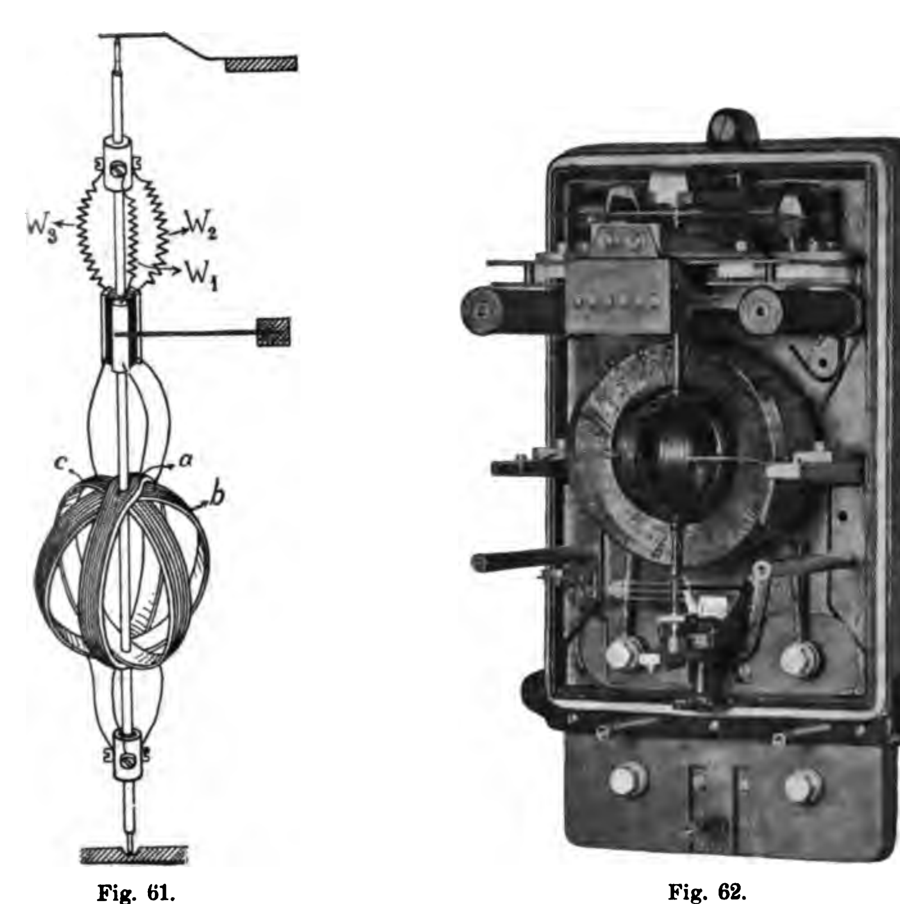


Fig. 61. Fig. 62.

das 15 bis 20 fache des Spulenwiderstandes betragen. Zweck dieser Konstruktion ist, die Reibung außer durch Verminderung des Kollektordurchmessers sehr wesentlich noch durch die Anwendung nur einer Bürste zu vermindern, indem die auf dem oberen Achsenende schleifende Bürste zu der Reibung nur in sehr geringem Maße beiträgt. Die Gesamtkonstruktion des Zählers ist aus Fig. 62 zu ersehen. Es sind hier gleichzeitig zwei weitere Neuerungen sichtbar. Die dreiteilige Wickelung bringt unvermeidlich eine gewisse Pulsation des Ankerstromes mit sich und damit auch eine Veränderlichkeit der Anlaufsempfindlichkeit je nach der Stellung, von welcher aus der Anker zum Anlauf gebracht werden soll. Diesem Übelstande abzuhelfen, bringt die Firma (D.R.P. 154 854) nahe zu den Ankerspulen in einer mittleren Zone zwei permanente Magnete an, welche bei dieser Anordnung auf das

gesamte Drehmoment keinen Einfluß haben, da sie während aufeinanderfolgender Perioden einer Ankerumdrehung auf die einzelnen Wickelungen desselben gleichviel beschleunigend wie hemmend wirken. Sie sind nun derart angebracht, daß ihre beschleunigende Wirkung zusammenfällt mit der Stellung geringerer Zugkraft, und ihre hemmende Wirkung mit derjenigen gesteigerten Antriebes, und üben somit auf das Drehmoment eine ausgleichende Wirkung aus. Der dreiteilige Kollektor und die auf demselben schleifende Bürste ist weiterhin in einer von der allgemeinen Konstruktion dieser Teile abweichenden Form ausgeführt. Gemäß D.R.P. 155901 werden die Kollektorsegmente nicht nebeneinander, sondern übereinander versetzt auf einem isolierenden Zylinder angeordnet und wird eine dreiteilige Bürste so angeordnet, daß in jedem Augenblick nur ein Streifen derselben auf einem Segmente aufliegt, während die anderen beiden infolge einer mechanischen festen Endverbindung nicht auf dem Kollektor schleifen können und hierdurch die Reibung vermehren.

81. A.-G. Mix & Genest.

Ein vierteiliger Kollektor wird in dem Zähler der A.-G. Mix & Genest, Berlin, angewendet. Die beiden Ankerwickelungen sind sowohl mit dem vierteiligen Stromwender wie in ihren Mitten durch einen hohen Widerstand miteinander verbunden. Die Stromzuführung erfolgt durch je zwei Doppelbürsten, die untereinander ebenfalls durch einen hohen Widerstand verbunden sind, beides zu dem Zwecke, die Funkenbildung zu verringern.

Auch bei diesem Zähler sind, um ein Verziehen der Grundplatte unwirksam auf die Zählerangaben zu machen, sämtliche Einzelteile auf einem besonderen Gestell innerhalb der Zählerkappe montiert. Die Enden der Kollektorsegmente sind durch die hohle Achse bis in das Innere der Ankerwickelung geführt, um so eine einfache und geschützte Verbindung zwischen denselben und den Kollektorsegmenten herzustellen. Der Kommutator besteht aus vier aus einer besonderen Silberlegierung hergestellten Lamellen. und ist sein Durchmesser auf den sehr geringen Betrag von ca. 1·9 mm reduziert. Das Ankergewicht beträgt nur ca. $^1/_2$ bis $^1/_3$ der sonstigen marktgängigen Konstruktionen. Die Ungleichmäßigkeiten des Drehmomentes werden durch eine kleine elektromagnetische, leicht mittelst einer Schraube regulierbare und von der Stromspannung abhängige Hilfs- und Hemmvorrichtung ausgeglichen, welche weiterhin selbst bei 50 % Überspannung ein Leerlaufen des Zählers verhütet, dagegen auch bei Unterspannung und sehr geringer Belastung ein sicheres Anlaufen ermöglicht, schon von etwa $^1/_2$ % der Volllast. Der Eigenverbrauch beträgt im Nebenschluß ca. 1·95 Watt pro 100 Volt. Zwischen magnetischer Dämpfung und Zählmotor ist ein kräftiger Eisenschirm angebracht, um eine Einwirkung der Bremsmagnete auf den Zählmotor zu verhüten. Bei der Ausführung für kleinere Stromstärken werden im Gegensatz hierzu diese Magnete direkt dazu benutzt, dem Anker anstelle der sonstigen Kompensationsspule ein zusätzliches Drehmoment zum Ausgleich der Reibung zu erteilen. Für sehr große Stromstärken wird statt des einfachen zweiteiligen Ankers ein astatischer Anker mit insgesamt zwei um 90 Grad gekreuzten einzelnen Spulen angewendet.

82. Landis & Gyr.

Die Firma Landis & Gyr, Zug i. d. Schweiz, verwendet einen Spulenanker mit getrennten, sich nicht kreuzenden Wickelungen, um hierdurch eine leichte und sichere Auswechselbarkeit schadhafter Ankerspulen zu ermöglichen, siehe Fig. 63 a, b.

83. Felten & Guilleaume-Lahmeyer-Werke.

Von den übrigen, die verstärkende Wirkung des Eisens benutzenden Zählertypen nähert sich der Wattstundenzähler der Felten & Guil-

LEAUME-LAHMEYER-Werke A.-G. Berlin, am meisten der normalen THOMSON-Type. Als bewegliches System wird ein astatischer Anker, aus zwei Grammeringen zusammengesetzt, verwendet. Zwei Ringe aus dünnem lamelliertem Eisen sind zu diesem Zwecke auf einer besonderen Wickelmaschine mit acht Wickelungen aus feinem Draht versehen, wobei je zwei



Fig. 63 a.



Fig. 63 b.

einander entsprechende Wickelungen der beiden Ringe hintereinander geschaltet und mit einem gemeinsamen Kollektor verbunden sind. Die festen Spulen haben, wie aus Fig. 64 ersichtlich, eine dementsprechende flache Gestalt. Die astatische Anordnung ist gewählt, um den durch die Verwendung von Eisen stromempfindlicheren Anker dem Einfluß des Erdfeldes zu entziehen. Die beiden Anker mit Ankerverbindungen und Kollektor bilden ein mechanisches Ganzes, welches, wie aus Fig. 65 a—c ersichtlich ist, auf die die Bremsscheibe tragende Achse direkt aufgesteckt werden kann. Die übrige Ausführung des Zählers, der ebenfalls mit einer Kompensationsspule ausgerüstet ist, ist was Dämpfung, Zählwerk, Bürstenkonstruktion anlangt, nach gleichen Grundsätzen ausgeführt wie der bereits beschriebene Amperestundenzähler derselben Firma.



Fig. 64.

84. Flügelwattstundenzähler der Siemens & Halske A.-G.

Ebenfalls durch Verwendung von Eisen im Anker wird die Empfindlichkeit erhöht in den früheren Konstruktionen des Flügel-Wattstundenzählers der SIEMENS & HALSKE A.-G., sowie des Veritas-Wattstunden-

7*

416500

zählers des Schiersteiner Metallwerkes G. m. b. H., Berlin. In beiden Fällen ist die Anordnung so getroffen, daß lediglich leichte Eisenanker umlaufen und von feststehenden Spannungsspulen, die periodisch umgeschaltet werden, zu dauerndem Umlauf gebracht werden. Der Antrieb

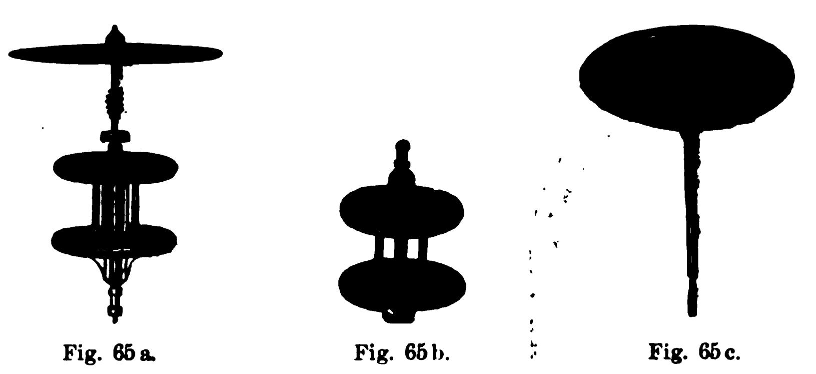


Fig. 65a. Fig. 65b. Fig. 65c.

erfolgt durch Wechselwirkung zwischen diesen die Intensität des Nebenschlußstromes repräsentierenden Eisenflügeln und den festen Starkstromspulen.

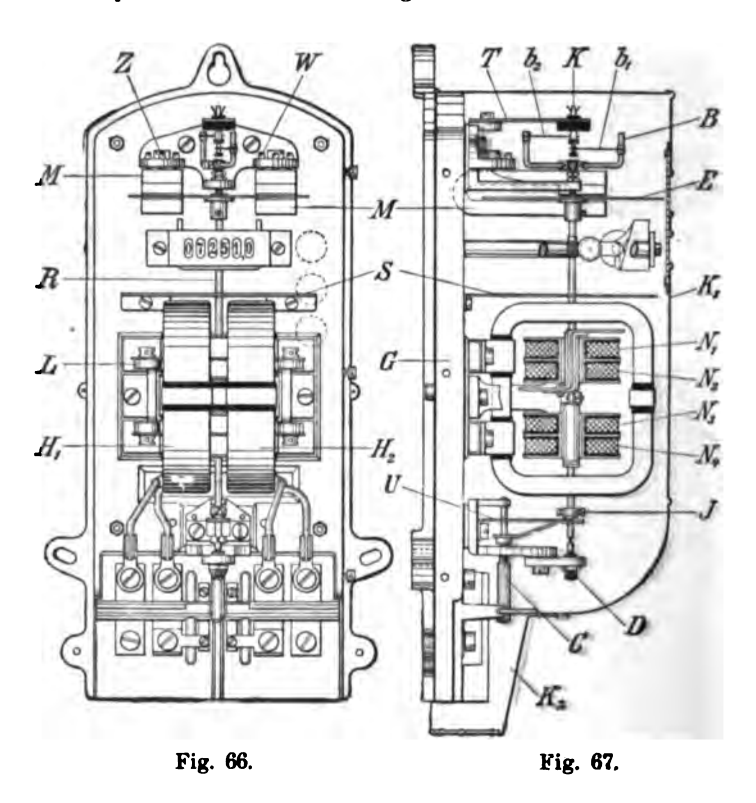


Fig. 66. Fig. 67.

In Fig. 66 und 67 ist die mechanische Anordnung und Konstruktion, Fig. 68 die neuere Schaltung des Flügel-Wattstundenzählers wiedergegeben. An der Zählerrückwand G ist in zwei Lagern die Ankerachse R drehbar angebracht, welche die beiden um 90 Grad gegeneinander versetzten aus der Zeichnung ersichtlichen Eisenflügel trägt. Diese werden durch die vier Spannungsspulen N_1, N_2, bzw. N_3, N_4 abwechselnd magnetisiert. Das ganze

Spannungssystem ist innerhalb der großen Starkstromspulen H_1, H_2 angeordnet. Oberhalb des oberen Halslagers ist der Stromwender an dem Messingstück *T* fest angebracht, welcher aus vier halbwalzenförmigen Schleifstücken besteht, auf denen die beiden aus je zwei dünnen Silberdrähten bestehenden Bürsten schleifen. Dieselben sind mittelst eines gemeinsamen Trägers an dem oberen Ende der Achse *R* befestigt. Die Schaltung ist nun so getroffen, siehe Fig. 68, daß durch diese Bürsten immer eine der oberen Magnetisierungsspulen mit einer der unteren Spulen verbunden wird. Während einer ganzen Ankerumdrehung werden also die Spannungsspulen jede zweimal mit wechselnder Stromrichtung eingeschaltet, so zwar, daß die Umschaltung jedesmal in dem Augenblicke erfolgt, wo sich einer der Eisenflügel in der Längsrichtung des von den Starkstromspulen erzeugten Feldes befindet. Es sind also bei diesem Zähler Starkstrom- wie Spannungsspulen sowie der Kollektor fest angeordnet, während sich Bürsten und Eisenarmatur drehen. Dadurch, daß jeder der Eisenflügel während einer vollen Umdrehung zweimal ummagnetisiert wird, wird innerhalb bestimmter Grenzen des Magnetisierungsstromes, die natürlich mit den gewünschten Grenzen der Betriebsspannung zusammenfallen, genügende Proportionalität erzielt, indem man so nur mit dem aufsteigenden Ast der Magnetisierungskurve arbeitet.

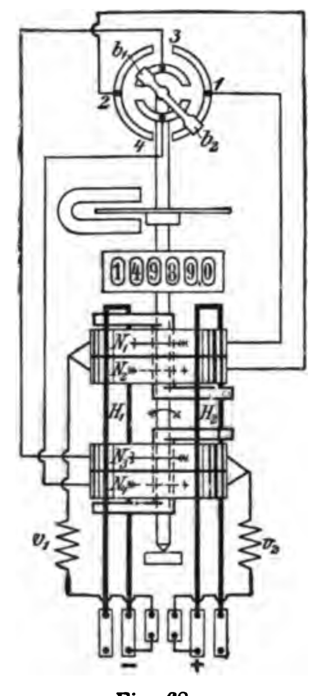


Fig. 68.

Von Interesse ist die hier angewendete Reibungskompensation. Durch etwas exzentrische Anordnung der vom Spannungsstrom erregten Magnetisierungsspulen zu den umlaufenden Eisenflügeln wird unabhängig von den Starkstromspulen ein schwacher Antrieb auf die beweglichen Eisenarmaturen hervorgerufen, auf dem gleichen Prinzip beruhend, wie die ersten Elektromotoren oder, besser gesagt, elektromagnetischen Rotationsapparate, d. h. auf der Anziehung von Solenoiden und Eisenkernen.

Der Magnetismus der Eisenflügel wird aber außerdem durch das Starkstromfeld beeinflußt. Dieser Einfluß kompensiert sich für eine ganze Umdrehung bei mittleren magnetisierenden Kräften, wo zwischen diesen und erzeugtem Magnetismus annähernde Proportionalität herrscht. Bei höherer Stromstärke bewirkt aber diese Erscheinung, daß die Zähler bei Vollbelastung im Vergleich zu schwacher und mittlerer Belastung etwas zu wenig anzeigen, bis zu 3 %, und bei Modellen für große Stromstärken noch mehr. Es muß dies bei der Eichung berücksichtigt werden.

Diese Konstruktion, die auch von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt zur amtlichen Beglaubigung zugelassen wurde, ist trotz zweifelloser Vorzüge nach der Verschmelzung der Zählerabteilungen der Firmen Siemens & Halske A.-G. und Elektrizitäts-A.-G. vorm. Schuckert & Co. von den Siemens-Schuckert-Werken zugunsten des einfacheren Thomson-Zählers verlassen worden. Inwieweit hierbei lediglich technische

Überlegungen und Abwägung der beiderseitigen Vorzüge oder Erwägungen anderer Natur maßgebend gewesen sind, entzieht sich der Beurteilung. Zweifellos verkörpert dieser Flügel-Wattstundenzähler ein für die Praxis sehr brauchbares Meßprinzip, welches namentlich im Punkte der Empfindlichkeit und des Stromverbrauchs große Vorteile bietet.

85. Neuer Veritas-Wattstundenzähler des Schiersteiner Metallwerkes.

Eine ähnliche Anordnung der wirksamen Teile, nur mit vielen Abweichungen in den der Stromumschaltung, und Registrierung bestimmten Teilen enthält der Veritaszähler des Schiersteiner Metallwerkes, der aber ebenfalls nicht mehr ausgeführt wird.

An seiner Stelle baut dieselbe Firma heute einen einfachen Thomson-Zähler, bei dem ähnlich wie in ihren noch zu besprechenden Zeitzählern eine dreiteilige Eisenarmatur mit gleicher Wickelung das bewegliche System darstellt, siehe Fig. 69, welche den Motor dieses Zeitzählers wiedergibt. Drei entsprechend gestanzte Eisenblechstreifen werden an ihren hervorragenden



Fig. 69.

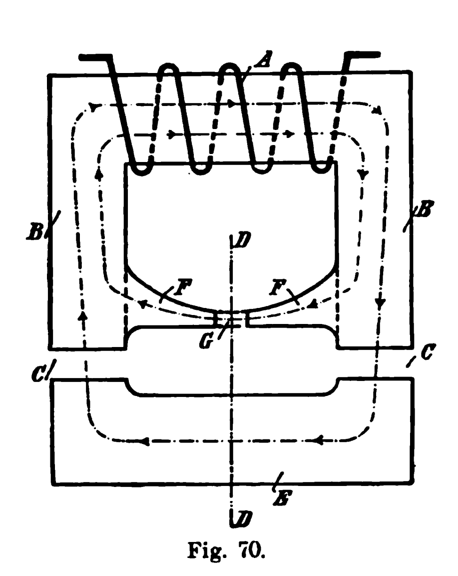


Fig. 70.

Enden in der abgebildeten Form umgebogen, nachdem sie vorher mit drei feinen Bewickelungen versehen sind. Besonderes Gewicht ist auf die Ausführung der stromzuführenden Bürsten gelegt, welche miteinander durch eine Spiralfeder verbunden sind und jede in ihrem Schwerpunkte befestigt werden. Hierdurch erzielt man, daß selbst bei heftigen Stößen die Bürste nicht von dem Kollektor abfedert, und daß sogar bei unrundem, schlagenden Kollektor durch die beiderseitige Verbindung ein dauernder guter Kontakt hergestellt wird. Der Anker wird der Wirkung einer einfachen Starkstromspule ausgesetzt, seine Energie in bekannter Weise durch eine magnetische Bremse verbraucht.

86. Hauptfeldanordnung nach Busch.

Es sind nun noch einige Konstruktionen zu erwähnen, die die Empfindlichkeit durch Benutzung von Eisen in dem wirksamen magnetischen Felde erhöhen. John Busch, Pinneberg, hat sich zu diesem Zwecke eine besondere Form des magnetischen Feldes schützen lassen, wie dieselbe in Fig. 70 abgebildet ist. Das durch einen Hufeisenmagneten, der durch die den Starkstrom führende Wickelung erregt wird, gebildete magnetische Feld, wie aus der Figur ersichtlich für eine Scheibenarmatur ausgebildet, ist dauernd

durch einen zwischen Anker und Magnet angeordneten magnetischen Nebenschluß geschwächt, der einen kleinen Luftspalt enthält. Durch bestimmte Bemessung des Eisenquerschnittes und der Form dieses Nebenschlusses, sowie von Querschnitt und Größe des Luftspaltes, soll erzielt werden, daß mit fortschreitender Sättigung dieses Nebenschlusses mehr und mehr Kraftlinien von demselben in das nutzbare magnetische Feld getrieben werden, so daß für das vorgesehene Strommeßbereich des Zählers annähernde Proportionalität zwischen magnetisierendem Strom und erzeugtem magnetischen Feld erreichbar wird. Derselbe Nebenschluß soll praktisch die Remanenz beseitigen, indem er im Ruhezustande fast alle Kraftlinien, der stets vorhandenen Remanenz entsprechend, von dem nutzbaren Felde absaugt.

87. Unipolar-Wattstundenzähler von Chamberlain & Hookham.

In den auf unipolarem Prinzip beruhenden Quecksilberzählern wird der Kollektor mit seinen Unvollkommenheiten durch Anwendung der Quecksilber-Stromzuführung umgangen. Um ihren bereits im vorstehenden beschriebenen Amperestundenzähler auch zur Messung der Watt fähig zu machen, ersetzt die Firma CHAMBERLAIN and HOOKHAM, Ltd. in demselben das durch einen permanenten Magneten geschaffene Feld durch einen von der Spannung erregten Elektromagneten, siehe Fig. 71. Dieser in dem unteren Teile des Zählers angebrachte topfartige Elektromagnet besteht aus übereinandergeschichteten dünnen Eisenblechscheiben, die durch die sie umgebende Spannungsspule in transversaler Richtung magnetisiert werden. Es ist bekannt, daß solche magnetischen Scheiben eine starke selbsentmagnetisierende Wirkung besitzen und hierdurch der Einwirkung der Hysteresis entgegenwirken. Da es sich bei dieser Ausführungsform nur darum handelt, innerhalb der praktisch vorkommenden und zulässigen Spannungsschwankungen Proportionalität zu erzielen, so kann dieses Ziel wohl mit für die Praxis ausreichender Genauigkeit erreicht werden.



Fig. 71.

Nicht unwesentlich anders ist die Konstruktion des von der SANGAMO-Electric-Co., Springfield, Illinois, hergestellten SANGAMO-Zählers, der sowohl für Gleich- wie für Wechselstrom ausgeführt wird.

88. Sangamo-Wattstundenzähler für Gleich- und Wechselstrom.

Der in Fig. 72 in den einzelnen Teilen des elektrischen Systemes, Fig. 73 in der Gesamtansicht mit abgehobener Schutzklappe abgebildete Zähler besitzt als elektrisches System ähnlich dem bereits beschriebenen FERRANTI-Amperestundenzähler eine in dem Felde des Elektromagneten drehbare Kupferscheibe, deren Kraft durch die in einer Aluminiumscheibe erzeugten Wirbelströme verbraucht wird. Die Kupferscheibe dreht sich, wie aus Fig. 72 ersichtlich, in einer aus entsprechend geformten Teilen aus Isolationsmasse gebildeten scheibenförmigen Kammer, die mit Quecksilber angefüllt wird. Die untere Hälfte erhält an zwei diametral gegenüberliegenden Stellen mittelst zweier kupferner Kontaktstücke den Strom zuge-

führt, der dann die Scheibe diametral durchfließt. In dem unteren Teile der Quecksilberkammer sind weiterhin zwei Magnetpole aus unterteiltem Eisen vorgesehen, welche mit dem aus Fig. 73 ersichtlichen unteren Jochstück durch Verschraubung verbunden werden. Letzteres trägt die Erregerwickelung. Der Oberteil der Kammer wird durch einen Metalldeckel, der zum Durchlaß der Achse mit einem Röhrenstück versehen ist, abgeschlossen. Außerdem ist in diesem Oberteil das magnetische Schlußstück für die beiden Magnetpole des Unterteiles enthalten. Die Zählerachse besteht aus zwei mechanisch voneinander trennbaren und elektrisch isolierten Teilen, welche durch einen Vierkantverschluß miteinander verbunden sind. Der obere Teil der Achse trägt die Aluminiumdämpferscheibe, welche sich zwischen den beiden in Fig. 73 ersichtlichen Magneten dreht. Außerdem trägt dieser Oberteil der Achse auch das Schneckenrad für den Antrieb des Zählwerkes.





Fig. 72.



Fig. 73.

Diese beiden Ausführungen, für Gleich- und Wechselstrom im großen und ganzen gemeinsamer Konstruktion, werden für beide Stromarten in verschiedener Weise geschaltet.

Bei dem Gleichstromzähler durchfließt der Starkstrom die Kupferscheibe, und zwar bei den Zählertypen bis zu 10 Amp. direkt und ungeteilt, darüber hinaus nur ein Teilstrom, der von besonderen Shunts abgenommen wird. Letztere sind von 10 bis 80 Amp. im Innern des Zählers angebracht, darüber hinaus bis zu 400 Amp. kommen besondere Nebenschlüsse außerhalb des Zählers zur Anwendung. Die auf dem Joch angebrachte Erregerwickelung wird in Hintereinanderschaltung mit einem Vorschaltwiderstand entsprechender Größe von einem der Netzspannung proportionalen Strom durchflossen und erzeugt hierdurch einen der Spannung annähernd proportionalen magnetischen Kraftfluß. Von einer besonderen Kompensierung der Hysteresis ist abgesehen. Der Gesamtwiderstand des Nebenschlußkreises ist so bemessen, daß bei 110 Volt ungefähr 4 Watt verbraucht werden; es findet also ein ziemlich hoher Eigenverbrauch statt. Um die mit der Geschwindigkeit

variable Reibung zwischen Kupferscheibe und Quecksilber auszugleichen, trägt bei Zählern über 10 Amp. die Erregerwickelung auf dem Jochstück noch eine oder einige Starkstromwindungen. Der Vorschaltwiderstand ist ebenfalls an der Rückseite des Zählers angebracht.

Für Messung von Wechselströmen wird die Rolle von Stark- und Schwachstrom vertauscht. Die Spannung wirkt auf die Kupferscheibe ein, der Strom auf das magnetische Feld. Es wird jedoch die Netzspannung nicht direkt in den Apparat eingeführt, sondern durch Vermittelung eines kleinen Transformators, der einen Sekundärstrom sehr geringer Spannung und großer Intensität erzeugt, den man durch die Kupferscheibe schickt. Für 110 Volt beträgt der Verlust hierfür ungefähr 2 Watt, bei 220 ungefähr 3 Watt. Da die Sekundärwickelung selbstverständlich von dem Primärkreise, hier also von der Netzspannung gut isoliert ist, braucht der Stromkreis der Ankerscheibe nicht gegen den Apparat besonders isoliert zu werden, was für die Betriebssicherheit des Apparates von Vorteil ist. Das Jochstück wird hier durch den Starkstrom erregt, und zwar bei Zweileitersystemen durch eine, bei Dreileiteranschlüssen durch zwei Starkstromwickelungen. Von irgendwelchen Vorrichtungen zum Verschieben der Spannungsphase wird hier abgesehen, da der Spannungstransformator derart konstruiert ist, daß ein gutes Zusammenwirken mit der Stromphase gewährleistet ist. Für höhere Stromleistungen über 150 Amp. hinaus kommen besondere Transformatoren zur Anwendung. Der Zähler ist gegen Änderungen der Periodenzahl ziemlich unempfindlich, und zeigt z. B. ein für 60 Perioden in der Sekunde bestimmter Zähler mit 133-Periodenbetrieb nur ca. 3 % zu wenig. Auch Kurzschlüsse haben der Natur der gewählten magnetischen Anordnung entsprechend geringen oder keinen Einfluß auf die Angaben des Zählers.

2. Oszillationszähler.

89. Prinzip des Oszillationszählers.

Von der im Thomson-Zähler auftretenden mechanischen Reibung entfällt der weitaus größte Teil, wie wir sahen, auf die Reibung zwischen Kollektor und Bürsten. Diesen Übelstand grundsätzlich zu beheben, gibt es nun ein nach dieser Richtung hin vollkommenes Mittel, von der rotierenden Bewegung des Zählmotors ab- und zu der oszillierenden überzugehen. Hat man eine einfache, in dem Felde einer Starkstromspule drehbare und von einem der Netzspannung proportionalen Strom durchflossene Schwachstromspule, deren Bewegung durch eine magnetische Bremse reguliert wird, so ist die Drehgeschwindigkeit dieser Spule dem Produkt beider Ströme in Stark- wie Schwachstromsystem, d. h. damit der momentan verbrauchten Energie proportional. Die Spule wird sich unter dem Einfluß beider Ströme so zu stellen suchen, daß die von beiden Spulen erzeugten magnetischen Kraftfelder möglichst zusammenfallen. Wird nun durch eine entsprechende Schaltvorrichtung in dem Augenblick, wo die bewegliche Spule ihre Endstellung einnimmt, der Strom umgekehrt, so dreht dieselbe sich den eben zurückgelegten Weg zurück. Wiederholt sich am Ende dieser zweiten Bewegungsphase dasselbe Spiel, so erzielt man eine oszillierende Bewegung der beweglichen Spule, wobei die Anzahl der Oszillationen in der Zeiteinheit ein Maß der verbrauchten elektrischen Energie darstellt. Es wird also der Kollektor und die schleifende Reibung an demselben hier durch periodische Strom-

umschaltung ersetzt. Während ihrer Bewegung zwischen den beiden Kontakten ist die Spule von dieser Art Reibung vollkommen frei.

Dies Prinzip ermöglicht aber noch folgende weitere Verbesserungen. Die oszillierende Bewegung des beweglichen Systems macht es möglich, dasselbe an biegsamen Zuleitungsschnüren pendelnd aufzuhängen und hierdurch auch die Lagerreibung auszuschalten. Diese auf den ersten Blick sehr bestechende Abänderung hat aber in der Praxis anderweitige Nachteile im Gefolge, so daß man zu der gewöhnlichen Anordnung des beweglichen

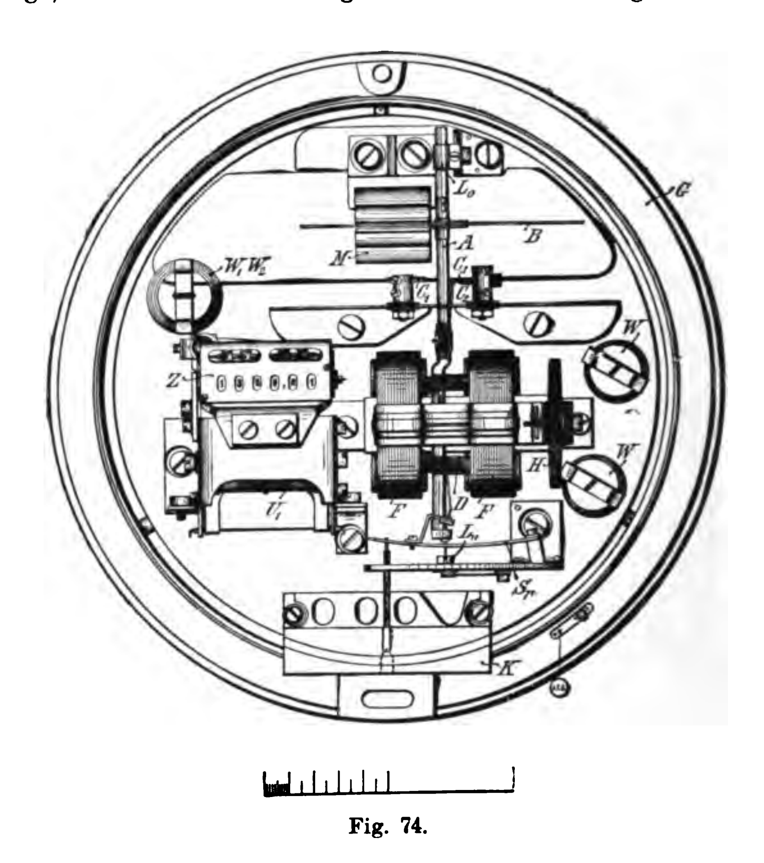


Fig. 74.

Systems in festen Lagern zurückgekehrt ist. Dagegen ermöglicht dies Oszillationsprinzip tatsächlich, die in dem Zählwerk auftretende Reibung vollkommen zu beseitigen. Wie aus der nachfolgenden Beschreibung hervorgeht, wird die Stromumschaltung durch ein besonderes Schaltwerk vorgenommen, welches bei jeder Kontaktgebung der beweglichen Spule betätigt wird. Es ist daher sehr naheliegend, mit dieser durch den Anzug eines Eisenankers seitens eines oder zweier Elektromagnete bewirkten Umschaltung gleichzeitig die Betätigung des mechanischen Zählwerkes zu verbinden, wie dies auch praktisch mit gutem Erfolg ausgeführt ist. Man kann sogar weitergehen und in besonderen Fällen, wie z. B. bei Zählern für sehr hohe Stromstärken, dieses Zählwerk, welches ja nicht mechanisch, sondern elektrisch gesteuert wird (von dem Oszillationsmotor aus), ganz außerhalb des Zählers anbringen, indem es mit demselben nur durch entsprechende dünne Zuleitungen verbunden ist.

90. Der A.E.G.-Oszillationszähler.

Von den verschiedenen, nach diesem Oszillationsprinzip entworfenen und ausgeführten Zählern wird heute nur noch der von Hummel entworfene Oszillationszähler von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft zu Berlin ausgeführt, und stellt tatsächlich einen sehr brauchbaren Zähler dar, dessen praktischer Wert fast ausschließlich von dem Entwurf, der mechanischen Ausführung und Betriebssicherheit der Kontakt- und Schaltvorrichtung bedingt ist. Der heute in vielen Tausenden von Exemplaren arbeitende Zähler hat den praktischen Beweis dafür erbracht, daß diese mit Berührungskontakten verbundene Schwierigkeit in einer praktisch durchaus befriedigenden Weise ihre Lösung gefunden hat.

Der von der A.E.G. hergestellte und zur amtlichen Beglaubigung zugelassene Oszillationszähler besitzt je nach der Stromstärke drei Ausführungen:

1. Form *KG* für Stromstärken bis zu 3, 5, 10, 15, 20, 30, 50 Amp., s. Fig. 74 und 75,
2. Form *G* für Stromstärken bis 75, 100, 150, 200, 300 Amp., s. Fig. 76 und 77,
3. Form *GG* für Stromstärken bis 300, 500, 750, 1000, 2000 und 3000 Amp., s. Fig. 78 und 79.

Die verschiedenen Schaltungen des Zählers und Ausführungen der Starkstromspule sind aus den entsprechenden Schaltungsschemata, Fig. 80 bis 83, zu ersehen. An Hand der letzteren schematischen Darstellungen des Zählers ergibt sich die Wirkungsweise des Zählers wie folgt: In dem von der Starkstromspule oder -Spulen F erzeugten magnetischen Felde ist die Drehspule D beweglich angeordnet und wird ihre Drehung durch die Kontakte C_1 und C_2 begrenzt, gegen welche sich der mit der Spule mechanisch und elektrisch verbundene Kontaktarm C_3 abwechselnd anlegt. Die noch vorhandene Lagerreibung wird wie üblich durch eine vom Spannungsstrom durchflossene Hilfsspule H kompensiert. Auf der gleichen Grundplatte, abgesehen von den Zählern für sehr große Stromstärken, ist das Umschaltwerk montiert, welches im wesentlichen aus den Umschaltelektromagneten U_1, U_2 und dem dazu gehörigen Anker samt Kontaktarm C_6, sowie den Kontakten C_4 und C_5 besteht. Die Schaltung des Spannungssystems ändert sich periodisch je nach dem momentanen Stand der Drehspule. Liegt dieselbe an keinem der Kontakte C_1 oder C_2 an, d. h. befindet sich die Spule auf dem Wege von dem einen Kontakt zum anderen, so verläuft der Spannungsstrom von der Klemme $+Z$ ausgehend, über Vorschaltwiderstand W und den einen Umschaltelektromagneten U_2, zwei Abzweigwiderständen W_2 und W_1, der Wickelung des anderen Umschaltmagneten U_1 über die Hilfsspule H zur

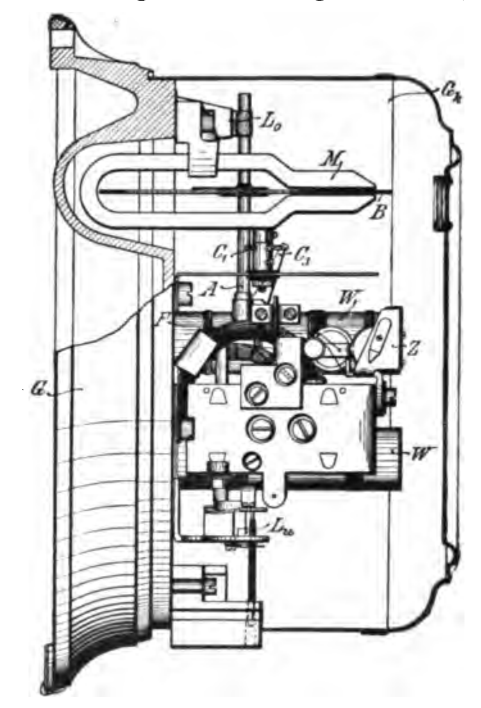


Fig. 75.

anderen Klemme — Z. Die Drehspule zweigt zwischen beiden Abzweigwiderständen W'_2 und W'_1 ab und ist an dem anderen Ende mit dem beweglichen Kontakt C_6 verbunden. Dieser Kontakt C_6 liegt während dieser freien Drehung der Spule D an einem der Kontakte C_4 und C_5 an. Liegt derselbe z. B. an C_5 an, so liegt die Drehspule hierdurch an der Mitte der beiden Abzweigwiderstände sowie der halben Erregerwickelung von U_2 an.

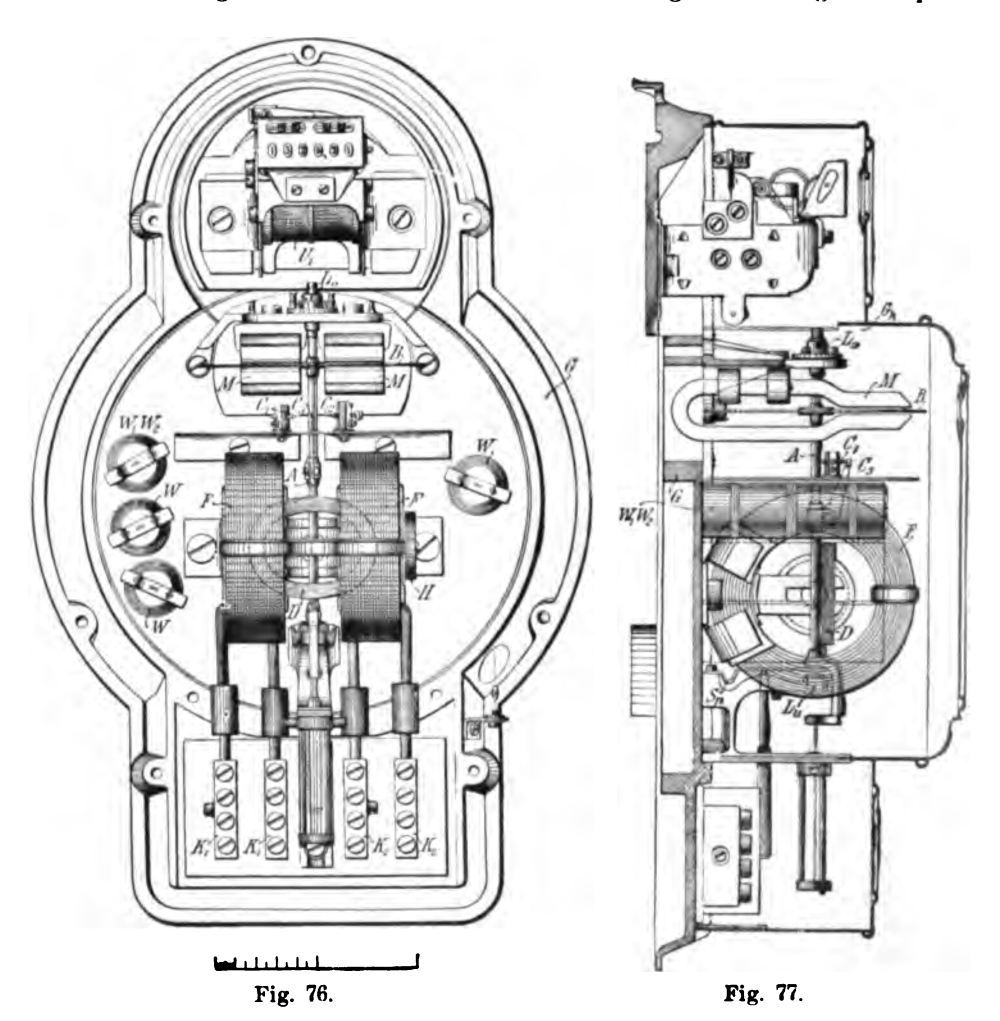


Fig. 76. Fig. 77.

Da sie nun einen viel kleineren Widerstand als die Abzweigwiderstände W'_1 und W'_2 besitzt, so geht etwa $^9/_{10}$ des gesamten Nebenschlußstromes durch sie, während so W'_2 und die eine Hälfte von U_2 fast stromlos sind. Hierdurch erhält der Umschaltmagnet U_1 das Übergewicht, zieht also, bzw. hält den Anker C_6 fest angezogen und stellt hierdurch den sicheren Kontakt zwischen C_5 und C_6 her. Die Drehspule bewegt sich nun unter der wechselseitigen Wirkung der beiden Ströme in F und D langsam auf den Kontakt C_1 zu. Sobald sie denselben berührt, wird hierdurch insbesondere der Elektromagnet U_1 kurzgeschlossen, indem der Strom von C_1 nunmehr direkt zur Mitte von U_2 übergeht. Sowohl die Drehspule selbst wie U_1 werden hierdurch stromlos und der Anker C_1 schlägt sofort nach der anderen Seite.

dem Anzuge von C_2 folgend, über und stellt mit C_4 den Kontakt her. Die mechanische Ausführung ist hierbei derartig, daß zwischen C_6 einerseits und C_4 und C_5 anderseits nur ein sehr geringer Spielraum vorhanden ist, indem zwei an C_6 angebrachte Kontaktfedern fast momentan den Strom an der einen Seite unterbrechen und an der anderen Seite herstellen. In dem Augenblick, wo C_6 den Kontakt C_5 verläßt, nimmt der Hauptzweig des Nebenschlußstromes seinen Weg von C_1 durch die Drehspule und W_2. Die Drehspule wird so von einem Strome umgekehrter Richtung durchflossen und dreht sich langsam dem anderen Kontakte C_2 zu, wo sich dasselbe Spiel wiederholt. Es ist nun für das sichere Arbeiten des Apparates von

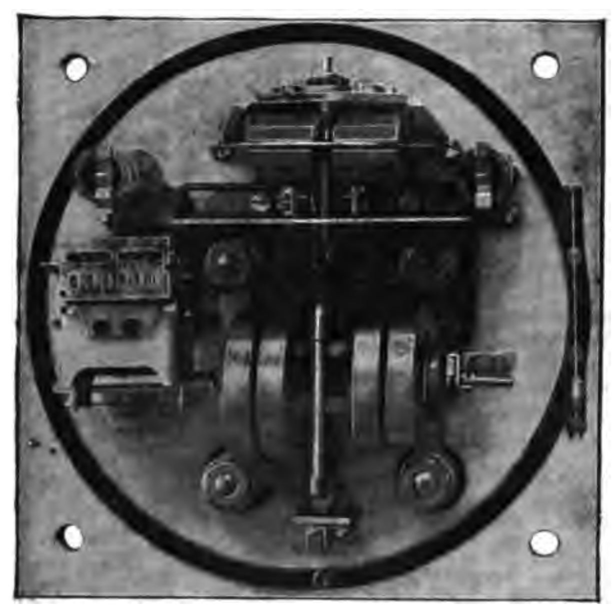


Fig. 78.

der größten Bedeutung, daß durch diese Art der Kontaktgebung einerseits in dem Momente, wo der Kontaktarm C_3 einen der beiden Kontakte C_1 und C_2 berührt, hierbei eine Spannung von ca. 80 Volt wirksam ist, so daß die Kontaktgebung mit großer Sicherheit erfolgt. Indem nunmehr unmittelbar nach dieser Kontaktgebung C_6 sich von dem einen der Kontakte C_4, C_5 zu dem anderen umlegt, wird der durch die Kontaktgebung zwischen C_3 einerseits und C_1 und C_2 anderseits bewirkte Kurzschluß eines großen Teiles des Nebenschlußkreises hierdurch aufgehoben, d. h. durch die nunmehr erfolgende Wiedereinschaltung der Drehspule D und eines der Abzweigwiderstände wird sowohl die Stromstärke, wie auch die zwischen C_3 und einem der Kontakte C_1 und C_2 bestehende Spannung bedeutend vermindert. Mit einer ungefähren Spannung von 3 Volt wird der Kontakt an C_3 aufgehoben, so daß eine Funkenbildung praktisch ausgeschlossen ist. Indem man also den Stromschluß unter großer Spannung, die Unterbrechung unter einer praktisch verschwindenden ausführt, erzielt man die genügende Betriebssicherheit an diesem empfindlichen Kontakte der Drehspule selbst. Denn die an dem Umschaltwerk vorhandenen weiteren Kontakte C_4, C_5 und C_6 geschehen unter der kräftigen Einwirkung der Umschaltmagnete. Da die federnde An-

ordnung von C_6 ferner ein stetes Blankreiben der Kontakte bewirkt, so ist in dieser Beziehung keine große Schwierigkeit vorhanden.

Was die praktische Ausführung der verschiedenen Zählertypen nach diesem System anlangt, so verwendet man bei den Formen *KG* und *G* eine Rückplatte aus Zinkguß, bei der Form *G* aus Marmor. Bei der Form *KG* ist für Zweileiter-Gleichstrom nur eine an der Rückwand befestigte Starkstromspule, bei derselben Type für Dreileiterschaltung, sowie der Type *G* sind zwei symmetrisch zur Drehachse angeordnete Starkstromspulen vorgesehen, welche durch entsprechend isolierte Klammern mit ihrer Wickelungsebene senkrecht zu der Rückwand befestigt werden. Fig. 78, 79 zeigen

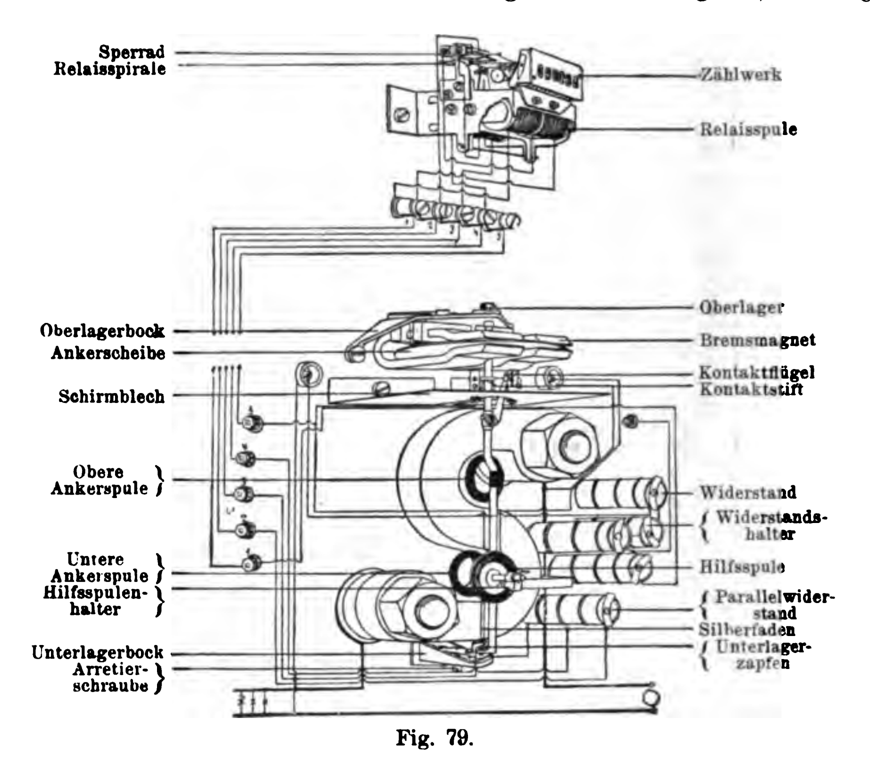


Fig. 79.

die Ausführung der Starkstromleiter bei der Form *GG*. Es kommen hierbei zur Vermeidung störender Beeinflussungen durch äußere Stromleitungen und Magnetfelder zwei Drehspulen mit entgegengesetzt gerichteten Feldern an derselben Achse übereinander angebracht zur Anwendung. Eine Hilfsspule *H* ist in jedem Falle an einem Messinghalter verschiebbar in der Nähe der Starkstromspulen angebracht. Die freigewickelte bewegliche Spule ist an einer hohlen Aluminiumachse befestigt, welche auch den Kontaktarm C_3 trägt. Die Dämpfungsscheibe *B* ist im oberen Teile der Achse angebracht und dreht sich in dem von dem oder den permanenten Magneten *M* gebildeten Felde. Um eine Beeinflussung der letzteren auf den Oszillationsmotor zu vermeiden, ist zwischen beiden ein 1·5 mm starker Schirm aus Eisenblech vorgesehen, welcher gleichzeitig die beiden Kontakte C_1 und C_2 trägt. An der Aluminiumachse sind weiterhin die aus dünnen Silberdrähten bestehenden Stromzuführungen für die bewegliche Spule angebracht. Die Achse dreht sich auf einem unteren Spurzapfen, der wie bei allen Zählern

derselben Firma mittels einer Stahlkugel in einer Saphirpfanne drehbar gelagert ist. Auch das obere Halslager wird neuerdings als Öllager ausgeführt.

Auf derselben Rückplatte ist der zweite wichtige Teil des Zählers, das Umschaltwerk, montiert. Dasselbe besteht aus zwei Elektromagneten U_1 und U_2, mit geteilter Erregerwickelung, deren Schaltung und allgemeine Form aus den schematischen Darstellungen, Fig. 80 bis 83, zu ersehen ist. Der den Kontaktarm C_6 steuernde Anker besteht aus zwei parallelen, jedoch

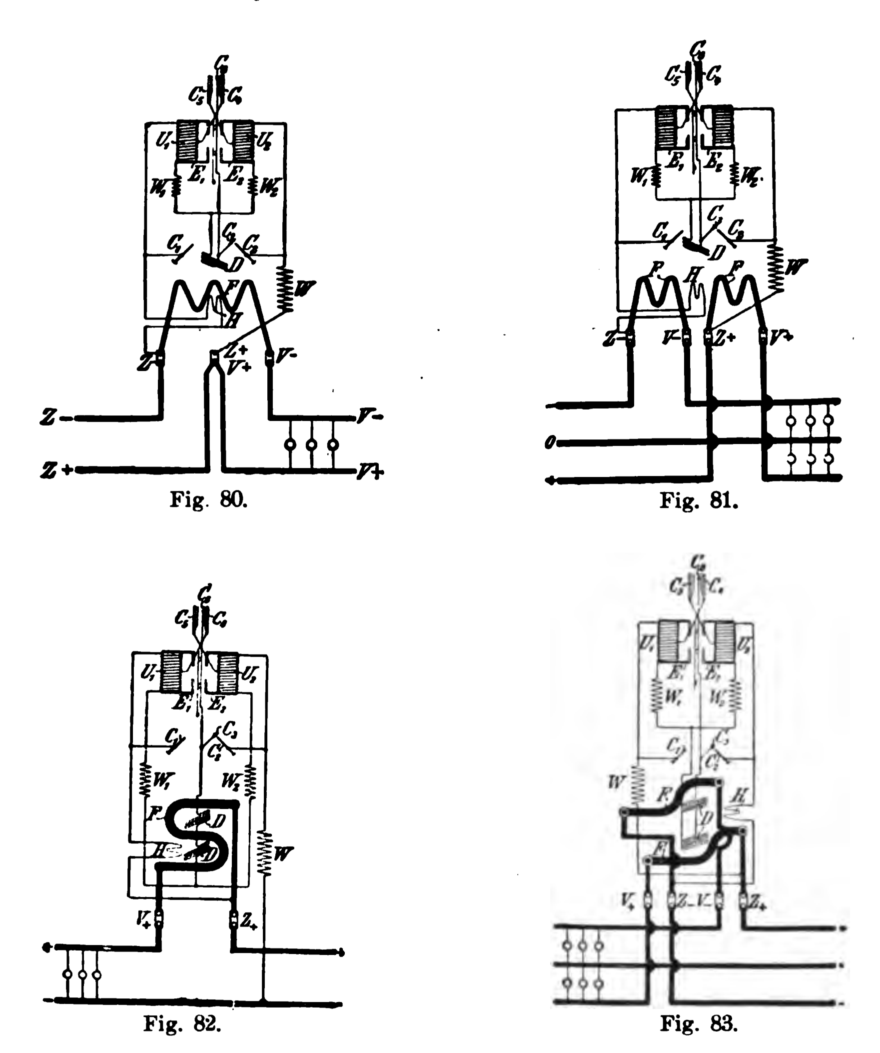


Fig. 80. Fig. 81. Fig. 82. Fig. 83.

voneinander isolierten Ankern aus Eisenblech, deren einer an einer Messingachse befestigt ist, während der andere den Kontaktarm trägt. Das Zählwerk wird direkt durch diesen Anker angetrieben und besteht aus einem Rollenzählwerk mit springenden Ziffern in üblicher Ausführung. Bei den *GG*-Zählern wird auf Wunsch das Zählwerk gemäß schematischer Darstellung von Fig. 79 als Fernrelais, außerhalb des Ankers anzubringen und mit ihm durch 5 Verbindungsdrähte von $^1/_2$ qmm Querschnitt zu verbinden, geliefert, stets bei den Zählern für 2000 oder 2 mal 1000 Amp.

Die Hauptstromspulen werden je nach der Stromstärke aus Draht, Blech

oder Gußstücken gebildet. Die Stromzuführungen sind ebenfalls von der Stromstärke abhängig verschieden ausgeführt, für sehr große Stromstärken kommt hintere Stromzuführung in Anwendung. Der Vorschaltwiderstand, sowie die Abzweigwiderstände bestehen aus blankem Nickeldraht von ca. 0·05 mm Durchmesser, der in Abständen auf isolierenden Zwischenlagen aufgewickelt ist, und soll der diesem Material innewohnende Temperaturkoeffizient den Änderungen der Dämpfung, hervorgerufen durch den Temperaturkoeffizienten des Aluminiums, entgegenwirken. Der Eigenverbrauch des Zählers ist infolge der Abwesenheit der Kollektorreibung ein sehr geringer, und beträgt der Nebenschlußstrom nur ca. 14 Milliampere, entsprechend 1·54 Watt Energieverbrauch pro 110 Volt. Die Hilfsspule H wird aus 1 mm starkem und einfach mit Seide besponnenem Kupferdraht gewickelt und besitzt ungefähr 200 Ohm. Die Drehspule D wird aus einfach mit Seide besponnenem Kupferdraht von 0·07 mm Durchmesser auf einem Kartonreifen aufgewickelt und mit Zwirn und Schellacklösung mechanisch befestigt.

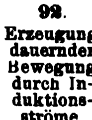
c) Auf Mehrphasen-Induktionsprinzip beruhende Wechselstrom-Wattstundenzähler.

1. Einphasenzähler.

Theorie und Allgemeines.

91. Konduktion und Induktion. Während bei dem Gleichstrom-Motorzähler dem beweglichen System die zu seinem Antriebe nötige elektrische Energie durch Stromwender und Bürsten zugeführt, also in ihm durch Leitung, Konduktion, erzeugt wird, geschieht dies in den auf FERRARISschem Drehfeldprinzip beruhenden Zählern durch elektromagnetische Erregung, durch Induktion. Man unterscheidet bekanntlich zwei Arten von Induktion, solche durch Bewegung hervorgerufen, wie die EMK in einem Dynamoanker, und solche in ruhender Anordnung, wie in einem Wechselstrom-Transformator. Es kann hier nur die Induktion der zweiten Art in Frage kommen, schon aus dem einfachen Grunde, weil der Zähler auch bei schwächster Belastung von dem Ruhezustande aus anlaufen soll. Weiterhin ist es wohl möglich, in einem elektromagnetischen System in dem beweglichen Teile durch Bewegung, d. h. durch äußere Zufuhr mechanischer Energie, elektrische Energie zu erzeugen, unmöglich dagegen ist es, das System auch nach Aufhören des äußeren Antriebes durch diese so erzeugten Induktionsströme in Bewegung zu erhalten. Daher ist diese Gattung der Induktionszähler auf Anwendung in Wechselstromkreisen beschränkt, und ist es andererseits unmöglich, Gleichstromzähler nach dem gleichen Prinzip zu bauen. Da diese induktive Einführung der elektrischen Energie keinerlei Kontakte und andere stromunterbrechende Teile benötigt, so ergibt sich aus der Abwesenheit dieser Organe bei dem Wechselstrom-Induktionszähler seine große Überlegenheit und Betriebssicherheit in elektromechanischer Beziehung dem Gleichstromzähler gegenüber. Der Induktionszähler ist jedoch gegen den auf rein dynamometrischem Prinzip beruhenden Gleichstrom-Motorzähler in mehreren anderen wichtigen Punkten, im Zusammenhange mit demselben Induktionsprinzip, im Nachteil. So ist er nur zur Messung der einen Stromart befähigt, und hierbei auch

noch von Periodenzahl und Kurvenform abhängig, wogegen die dynamometrischen Zähler Gleich- und Wechselstrom mit schlechthin gleicher Genauigkeit zu messen gestatten, und im letzteren Falle von Periodenzahl und Kurvenform praktisch so gut wie unbeeinflußt sind. Die bei dem Induktionszähler weiterhin gesondert auftretenden Dämpfungserscheinungen der Strom- und Spannungsmagnetsysteme vermindern außerdem die mit einem solchen Zähler zu erzielende Meßgenauigkeit, welcher Nachteil ebenfalls bei den Gleichstrom-Motorzählern nicht vorhanden ist. Wie jedoch im Folgenden in Übereinstimmung mit den praktischen Erfahrungen gezeigt wird, lassen sich diese kleinen dem Induktions-Meßprinzip anhaftenden Schönheitsfehler durch geschickte Konstruktion auf ein solch geringes Maß zurückführen, daß, von der Unmöglichkeit der Anwendung der Induktionszähler zur Gleichstrommessung abgesehen, die Meßgenauigkeit praktisch die gleiche wie bei dynamometrischen Zählern wird, und alles in allem eine große praktische Überlegenheit der FERRARIS-Zähler übrig bleibt.



93. Erzeugung dauernder Bewegung durch Induktionsströme.

Ist es also möglich, bei diesen Induktionszählern dem beweglichen System ohne Stromwender und Bürsten elektrische Energie zuzuführen, so

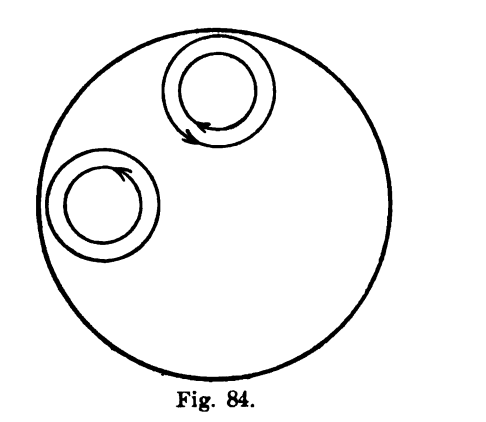


Fig. 84.

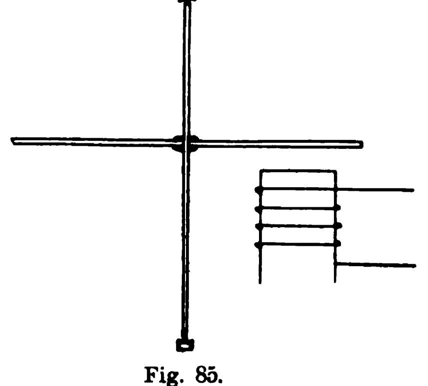


Fig. 85.

wird weiter zu untersuchen sein, in welcher Weise diese Induktionsströme eine kontinuierliche Bewegung zu erzeugen gestatten, und inwiefern letztere ein Maß der betr. elektrischen Primärströme, d. h. der zu messenden Wechselstromenergie bildet.

Es ist von dem Transformator her bekannt, daß Primär- und Sekundärströme für gewöhnlich eine Phasenverschiebung von annähernd 180^0 besitzen, woraus sich ergibt, daß in jedem derartigen Apparat bei geschlossenem Sekundärkreis zwischen Primär- und Sekundärwickelung eine Abstoßung, ein mechanischer Druck voneinander weg besteht, der durch die mechanische Befestigung beider Windungssysteme aufgenommen wird.

Bringt man bei geeigneter mechanischer Konstruktion die Sekundärwickelung beweglich an, so wird sie sich je nach der Belastung mehr und mehr von der Primärwickelung entfernen, was bekanntlich in Sonderkonstruktionen zur automatischen Regulierung der Stromstärke im Sekundärkreis, sowie seinerzeit von PEUKERT zur Konstruktion seiner Induktions-Meßinstrumente benutzt ist. In jedem Falle tritt hierbei aber nur eine einmalige Abstoßung ein, und es ist unmöglich, auf diesem Wege einen kontinuierlichen Antrieb irgend eines beweglichen Systemes zu erhalten.

Dies läßt sich leicht durch einen Versuch nachweisen. Bringt man eine leicht drehbare Metallscheibe in der Nähe, oberhalb oder unterhalb eines, durch ein Wechselfeld erregten Elektromagneten an, siehe Fig. 84 u. 85, so bilden die über dem Pole des betr. Magneten befindlichen Teile der Scheibe die Sekundärwickelung des aus Scheibe, Magnet und Erregerwickelung gebildeten Transformators. Wohl tritt eine Abstoßung zwischen Pol und Scheibe ein, die die Entfernung zwischen beiden zu vergrößern trachtet. Da dieser Druck aber von der Achse aufgenommen wird, so kann er zu keiner oder gar einer dauernden Rotation der Scheibe führen. Letztere ist aus dem Grunde ausgeschlossen, siehe Fig. 85, weil die von dem Elektromagneten in der Scheibe induzierten Ströme nach allen Seiten hin gleichmäßig von dem Pol abgestoßen werden. Die Resultante dieser sämtlichen Einzelkräfte ist Null.

Die Scheibe bleibt jedoch nur in dem Falle in Ruhe, wenn die magnetische Symmetrie der Gesamtanordnung eine vollkommene ist und durch keinerlei störende Nebenumstände ganz oder teilweise aufgehoben wird. Bekanntlich suchen in einem elektromagnetischen System mit relativ beweglichen magnetischen Massen letztere sich immer so zu stellen, daß die magnetischen Linien auf dem betr. Wege den geringsten Widerstand finden. Bei Gleich- und Wechselstrom hat das zu bedeuten, daß die erzeugten magnetischen Linien so verlaufen, wie sie in etwa vorhandenen ferromagnetischen Substanzen den besten Rückschluß finden. Bei Wechselstrom kommt das weitere Bestreben hinzu, daß das magnetische System sich möglichst weit weg von zusammenhängenden Metallmassen einzustellen sucht, da die in diesen erzeugten Ströme in ihrer Rückwirkung schwächend auf das ursprüngliche Feld einwirken. Im vorliegenden Falle ist also unter magnetischer Symmetrie zu verstehen, daß die der Scheibe benachbarte Polfläche des Magneten einen gleichen Abstand von der Scheibe hat, daß die Scheibe selbst in allen ihren Teilen gleich gut leitend ist, d. h., daß sie kreisrund, von gleicher Stärke und durchaus homogener Beschaffenheit und elektrischer Leitungsfähigkeit ist, und schließlich, daß sich in der Nähe von Magnet und Scheibe entweder überhaupt keine magnetischen und andere fremde Metallmassen, oder doch in durchaus gleichmäßiger Verteilung befinden. Ist diese Symmetrie nicht gewahrt, so tritt eine je nach dem Grade und der Art der Unsymmetrie mehr oder minder große, teilweise oder kontinuierliche Drehung nach der einen oder anderen Richtung der Scheibe ein.

Es liegt nun der Gedanke nahe, eine Bewegung dadurch erzielen zu wollen, daß man in der Nähe des ersten Magnetpoles und der von diesem induzierten Ströme einen zweiten Wechselstrommagneten anbringt, der von demselben Strom erregt wird und daher ein Feld gleicher, oder um 180° verschiedener Phase erzeugt. Ist das Feld z. B. um 180° verschieden, weist also der zweite Magnet in jedem Moment die entgegengesetzte Polarität zu dem ersten auf, so übt er zweifellos auf die von dem ersten in der Scheibe induzierten Ströme eine anziehende Wirkung aus. Bei sonst symmetrischer Anordnung auch dieses zweiten Magneten erfolgt jedoch auch in diesem Falle keinerlei Rotation der Scheibe, da dieser zweite Magnet selbstverständlich ebenfalls in der Scheibe Induktionsströme erzeugt, deren Rückwirkung auf den ursprünglichen Magneten genau gleich und entgegengesetzt dem Antriebe ist, den der zweite Magnet auf die von dem ersten erzeugten Ströme ausübt. Eine Rotation der Scheibe tritt aber sofort ein, sobald die

Phase dieses zweiten Feldes nicht genau gleich oder um 180° von dem ersten verschieden ist. Die Stärke des Antriebes wird ein Maximum, sobald der Phasenunterschied beider Magnetfelder 90° beträgt.

93. Induktionsmehrphasenprinzip.

Geht man beiden Erscheinungen, dem Eintreten der Rotation bei nur einem Wechselfelde und irgend welcher Unsymmetrie in der magnetischen Anordnung, sowie bei zwei in der Phase voneinander verschiedenen Wechselfeldern, näher auf die Spur, so ergibt sich als gemeinsame Ursache, daß das wirksame magnetische Feld außer seiner zeitlichen Veränderung in beiden Fällen noch örtliche Verschiebungen erleidet, aus einem einfachen Wechselfelde teilweise zu einem Wander- oder Drehfelde wird. Diese von Ferraris und Tesla fast gleichzeitig entdeckte Erscheinung hat in den Mehrphasenmotoren bekanntlich eine sehr wichtige Anwendung für Starkstromzwecke erhalten, hat sich dann aber auch für den vorliegenden Zweck, als Meßprinzip äußerst fruchtbar erwiesen. Betreffs des wirksamen magnetischen Feldes ist nun wohl zu beachten, daß dasselbe in beiden Fällen nicht von dem oder den beiden vorhandenen Magnetpolen allein gebildet wird, vielmehr eine Resultierende, im ersteren Falle des primären Feldes sowie der anderen von ihm in der Scheibe und eventuell noch außerhalb derselben erzeugten Induktionsströme, im zweiten Falle eine Resultierende beider Magnetfelder, sowie der von ihnen erzeugten Induktionsströme ist. Wie aus der Theorie der Mehrphasenmotoren bekannt ist (siehe hierzu Handbuch II, 1 in 27), treten bei dem Zusammenwirken solcher phasenverschobenen Ströme und Felder sowohl ein resultierendes Drehfeld und daneben von den einzelnen Magnetpolen herrührende einfach pulsierende Wechselfelder auf. Die Theorie ergibt weiter, daß der auf den Rotor, die umlaufende Scheibe oder Trommel, ausgeübte mechanische Antrieb lediglich den von dem Drehfelde erzeugten Induktionsströmen zuzuschreiben ist, während die pulsierenden Wechselfelder in jedem Falle, mag es sich um einen Motor oder einen Zähler handeln, nachteilige Wirkungen ausüben. Die Größe des Drehmomentes ist in dem praktisch wichtigsten Falle des Zweiphasenstromes proportional der Intensität der beiden phasenverschobenen Felder und dem Sinus ihres Verschiebungswinkels.

94. Das Induktionswattmeter.

Um zu dem hier vorliegenden Zwecke der Energiemessung von Wechselströmen zurückzukehren, so ergibt sich hieraus eine einfache Konstruktion eines Wechselstrom-Energiemessers. Bringt man an der drehbaren Metallscheibe, wie in Fig. 84 angedeutet, zwei auf sie induktiv einwirkende Wechselfelder an, deren eines durch eine starkdrähtige und nur wenige Windungen aufweisende Spule vom Verbrauchsstrom, das andere durch eine Rolle mit vielen dünnen Windungen von der Spannung erregt wird, so wird der das zweite erregende und der Spannung proportionale Strom infolge der großen Windungszahl der Spannungsspule und der sich hieraus ergebenden hohen Selbstinduktion eine starke Phasenverschiebung gegen die Netzspannung und damit auch, bei induktionsloser Belastung des Netzes, gegen das Starkstromfeld erhalten. Ganz auf 90° läßt sich allerdings die Verschiebung dieses der Spannung proportionalen Stromes und damit für gewöhnlich auch des Spannungsfeldes selbst, auch unter Hinzuschaltung irgend welcher Drosselspulen, nicht erzielen. Gibt man dem sich hierbei ergebenden Antriebe auf die Scheibe ein Gegengewicht in Form einer Torsionsfeder und bringt an der Achse einen Zeiger an, so erhält man ein Induktionswattmeter, läßt man dagegen ohne Zufügung von Torsionsfedern die Achse dem auf sie

einwirkenden Zuge folgen, läßt aber ihrer Drehung in Form einer magnetischen Wirbelstrombremse eine Gegenkraft entgegenwirken, und überträgt ihre Umdrehungen mittels Schneckenrad auf ein Zählwerk, so hat man einen einfachen Induktions-Wattstundenzähler. Die ersten Induktionszähler, als deren typischen Vertreter man den in Europa im Anfange der Wechselstromtechnik viel benutzten BLATHY-Zähler bezeichnen kann, waren so einfach konstruiert.

Sobald es sich um Messung induktionsfreier Belastung handelt, zeigt ein solches Instrument die Leistung vollkommen genau an. Tritt aber eine irgendwie erhebliche Phasenverschiebung in dem Nutzstromkreise hinzu, so stellt sich ein schwerer Übelstand dieser Meßanordnung heraus. Da die Leistung irgend eines Wechselstromkreises gleich dem Produkt der effektiven Werte von Strom und Spannung, multipliziert mit dem Cosinus ihres Verschiebungswinkels ist, das vorbeschriebene einfache Induktionswattmeter jedoch in seinem Antriebe von dem Sinus des Verschiebungswinkels abhängig ist, so ergibt sich, daß das Instrument keine Konstante besitzt, daß sich diese vielmehr mit der Phasenverschiebung in einer für eine genaue Messung völlig unzulässigen Weise ändert.

Dies läßt sich zahlenmäßig wie folgt beweisen (siehe MÖLLINGER ETZ. 1898, S. 607 ff.).

Bezeichnet man das von der Spannungsspule erzeugte Magnetfeld mit N_1, welches der Netzspannung E proportional ist und gegen dieselbe um den Winkel φ_1 verzögert ist, so ist bei dem Strom J das von der Scheibe entwickelte Drehmoment D

$$D = G_1 J N_1 \sin \frac{J}{N_1},$$

wobei G_1 eine Konstante, $\frac{J}{N_1}$ den Verschiebungswinkel zwischen J und N_1 bedeutet. In gleicher Weise wie bei dem THOMSON-Zähler ist auch hier die von der magnetischen Bremse absorbierte, Leistung dem Quadrat der Tourenzahl n proportional, oder das dem Antriebe der Scheibe entgegenwirkende Moment der Bremsung ist der Tourenzahl n direkt proportional und es besteht die Gleichung

$$G_1 J N_1 \sin \frac{J}{N_1} = Cn,$$

was auch zufolge der angenommenen Proportionalität von N_1 zu E

$$n = G_2 J E \sin \frac{J}{N_1}$$

geschrieben werden kann.

C bedeutet wie immer eine vom Material, Form usw. der Dämpfungsscheibe abhängige Konstante. Da der elektrische Effekt $\mathfrak{E}$, der in der Anlage verbraucht wird,

$$\mathfrak{E} = J E \cos \varphi$$

ist, wobei φ den Verschiebungswinkel zwischen J und E bedeutet, so folgt aus den beiden Gleichungen

$$n = G_2 \frac{\mathfrak{E}}{\cos \varphi} \sin \frac{J}{N_1}.$$

Da nun der Winkel $\frac{J}{N_1}$, der Verschiebungswinkel zwischen Starkstrom- und

Spannungsfeld in dem Induktionszähler, von seinem Werte φ_1, bei induktionsloser Belastung, bei eintretender Phasenverschiebung φ im Verbrauchsstromkreise auf den Betrag $\varphi_1 - \varphi$ übergeht, so ist die Tourenzahl

$$n = G_2 \mathfrak{E} \frac{\sin(\varphi_1 - \varphi)}{\cos \varphi}.$$

Es folgt hieraus, daß sich die Konstante des Zählers mit verschiedener Phasenverschiebung in der Anlage ändert; denn sobald φ_1 nicht gleich 90° ist, ändert sich der Wert des Bruches $\frac{\sin(\varphi_1 - \varphi)}{\cos \varphi}$ je nach der Belastung. Ist z. B. $\varphi_1 = 80^0$, so ändert sich die Zählerkonstante Z mit der Verschiebung φ wie der Ausdruck $\frac{\cos \varphi}{\sin(80^0 - \varphi)}$ gemäß folgender Tabelle:

φ	Z
0°	1·02
45°	1·23
70°	1·97.

Hierbei entspricht 45° und 70° ungefähr der einem vollbelasteten, bzw. leerlaufenden Einphasenmotor eigentümlichen Phasenverschiebung. Die Konstante des Zählers würde also mit der Belastung des Motors von 1·23 bis 1·97 schwanken. Sie wäre ferner bei Belastung mit einem leerlaufenden Motor im Verhältnis 1·97 : 1·02 gleich 1·93 größer wie bei induktionsfreier Belastung des Netzes mittels Glühlampen.

95. Hauptbedingung von 90° Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung.

Daß die dem Apparat daher von vornherein zu erteilende Verschiebung der Spannungsphase gegen die Netzspannung, soll er unter jeder Art Belastung korrekt anzeigen, genau 90° betragen muß, ergibt sich aus der Betrachtung der beiden Gleichungen

$$Cn = G_1 JE \sin(\varphi_1 - \varphi)$$

für die von dem Apparat angezeigte Energie, und

$$Cn = G_1 JE \cos \varphi$$

als die von demselben richtig zu messende Energie. Dies setzt

$$\sin(\varphi_1 - \varphi) = \cos \varphi$$

voraus, was nur bei $\varphi_1 = 90^0$ stimmt. Es ergibt sich also für das richtige Arbeiten des Induktionswattmeters, gleichgültig ob als direkt zeigendes Instrument oder als Zähler die unerläßliche Bedingung, daß bei induktionsloser Belastung zwischen den beiden von dem dem Verbrauchsstrom und dem der Spannung proportionalen Strom in dem Apparat hervorgerufenen Feldern eine Phasenverschiebung von genau 90° vorhanden sein muß. Ist, was praktisch häufig der Fall ist, das von dem Verbrauchsstrom erzeugte Feld mit dem Strom selbst in Phase, um von der geringen durch die Hysteresis bedingten Verschiebung abzusehen, so muß das Spannungsfeld eine Phasendifferenz von genau 90° gegen die Netzspannung aufweisen.

Bei dieser Verschiebung der Phase des Spannungsfeldes gegen die äußere Netzspannung ist nun wohl zu beachten, worauf bereits hingewiesen wurde, daß es sich hierbei um die Verschiebung des resultierenden Spannungsfeldes gegen die äußere Netzspannung handelt. Bedingung ist also, daß bei vollkommen induktionsfreier Belastung des Netzes die beiden

von der Strom- und Spannungsphase erzeugten Felder mit Berücksichtigung der Rückwirkung der von ihnen in dem Kurzschlußanker erzeugten Induktionsströme auf sie selbst diese Verschiebung von genau 90° aufweisen müssen. Man nahm anfänglich an, nachdem diese Notwendigkeit mehr und mehr klar erwiesen wurde, es sei unbedingt notwendig, dem das Spannungsfeld erzeugenden Strome selbst diese Verschiebung von genau 90° zu erteilen. Dies ist natürlich durch Drosselspulen allein in keiner Weise möglich. Wohl aber läßt sich die Verschiebung des resultierenden Spannungsfeldes um genau 90° sehr wohl ohne irgend welche komplizierte Schaltungen erzielen, wie dies die heutigen Konstruktionen auch klar erweisen.

Zur Erreichung dieses Zieles stehen zwei Wege offen. Man gibt dem dieses Spannungsfeld erzeugenden Strome oder sogar der diesen Erregerstrom hervorrufenden EMK von vornherein eine solche Verschiebung, daß das erzeugte Feld den gewünschten Phasenunterschied von 90° erhält. Dies ist durch die Brückenschaltung von Görges erreicht worden. Alle anderen Methoden sind als Kombination und Übereinanderlagerung entsprechender Ströme und Magnetfelder zu bezeichnen, von denen die wichtigsten nachstehend bei den betreffenden Konstruktionen beschrieben sind. Zu beachten ist, daß die Verschiebung nicht notwendig nur an der Phase des Spannungsfeldes erfolgen muß, sondern daß hierzu auch, was neuerdings mehrfach geschieht, das Hauptstromfeld in geeigneter Weise geändert werden kann.

Hat man also durch eine dieser Methoden die Phasendifferenz zwischen den wirksamen Feldern auf genau 90° abgeglichen, so ist das bisherige Sinusmeßgerät in einen Cosinusapparat überführt, der die verbrauchte Wechselstromenergie bei jeder Phasenverschiebung genau mißt. Mit Torsionsfeder und über einer Skala spielendem Zeiger versehen, erhält man ein genau zeigendes Wattmeter, durch Anbringung einer magnetischen Bremse und Zählwerk einen genau registrierenden Wechselstrom-Wattstundenzähler, bei dem in gleicher Weise wie bei dem Thomson-Motorzähler die jeweilige Geschwindigkeit des Apparates bei jeder Phasenverschiebung der verbrauchten Energie proportional ist.

Der Induktionszähler.

96. Elektrische Eigenschaften. Der Induktionszähler weist daher dem Gleichstromzähler gegenüber den großen Vorteil auf, daß keinerlei Stromwender und Bürsten, Kontakte oder dgl. diffizile Apparate vorhanden sind. Wie aber schon bemerkt wurde, ist er ihm in rein elektrischer Beziehung, was die Genauigkeit seiner Angaben anlangt, aus verschiedenen Gründen wesentlich im Nachteil. Die im Vorstehenden gemachte Angabe, daß das auf genau 90° abgeglichene Induktionswattmeter unter dem Einfluß einer magnetischen Bremse in seiner momentanen Geschwindigkeit ein genaues Maß der verbrauchten elektrischen Energie darstellt, gilt nur unter bestimmten, in Praxis nicht immer erfüllten Voraussetzungen. Zunächst ist wie bei dem Gleichstrom-Motorzähler wichtigste Bedingung, daß die Reibung auf einen zu vernachlässigenden Betrag beseitigt ist, was im Folgenden noch näher erläutert wird.

Der Zähler wird aber auch nur dann genau registieren, sobald außer der Reibung die magnetische Bremse die einzige vorhandene Gegenkraft darstellt. Das ist aber nicht der Fall, da von den Strom- und Spannungspolen auf den rotierenden Kurzschlußanker zusätzliche Bremsmomente ausgeübt werden, die die Genauigkeit der Messung stören. Wie bereits mehr-

fach ausgeführt wurde, entsteht ein homogenes Drehfeld nur unter der Bedingung, daß beide Feldkomponenten genau gleich groß sind und sich in ihrer Gesamtheit zu dem resultierenden Drehfelde zusammensetzen. Sind zunächst beide Felder verschieden groß, so entsteht kein homogenes Drehfeld, sondern ein solches von elliptischer Form, wobei lediglich das durch den der Ellipse eingeschriebenen Kreis bestimmte Drehfeld das nutzbare Drehmoment erzeugt. Das übrigbleibende pulsierende Wechselfeld erzeugt natürlich in der umlaufenden Armatur schädliche Wirbelströme.

Aber selbst bei gleicher Stärke beider Felder treten das nutzbare Drehmoment schwächende Bremswirkungen auf, sobald ein irgendwie erheblicher Teil der Kraftlinien eines einzelnen Teilfeldes in nächster Nähe dieses Feldes seinen Schluß findet, ohne irgendwie das andere Teilfeld zu durchsetzen und sich mit ihm zu dem nutzbaren Drehfelde zu kombinieren. Dies gilt in gleicher Weise für industrielle Mehrphasenmotoren wie Induktionszähler. Man vermeidet diese schädlichen Einzelfelder im ersteren Falle wie bekannt durch möglichst gleichmäßige Ausbildung des induzierenden Teiles, des Stators. Bei dem Zähler ist aus mechanischen und konstruktiven Rücksichten diese Form des Mehrphasenmotors nicht nachzuahmen, und treten daher diese Teilfelder mehr oder minder stark tatsächlich auf. Von vornherein ist zu ihrer Unterdrückung oder Schwächung die Form der Trommel- oder Kurzschlußanker günstiger als die Scheibe, da bei letzterer unter Verwendung der namentlich anfänglich wie z. B. bei dem Blathy-Zähler benutzten sehr kurzen und vollkommen geschlossenen Magnetsysteme nur die Streufelder das wirksame Drehmoment bilden mußten. Man bevorzugt aus diesem Grunde neuerdings die Anbringung der Strom- und Spannungswickelung auf demselben Eisenkern, um die Felder in möglichst großem Umfange miteinander in Wechselwirkung zu bringen. Ist diese schädliche Bremsung des Strom- und Spannungssystemes nicht vollkommen zu vermeiden, so lassen sich doch die Verhältnisse konstruktiv so treffen (siehe hierzu Stern, ETZ. 1902, Heft 35), daß ihre Wirkung auf die Zählerangaben praktisch vernachlässigt werden kann. Hierzu sind als nützliche Punkte zu beachten, daß erstlich die hauptsächliche Bremsung durch den permanenten Magneten möglichst kräftig ausfallen, d. h. daß das nutzbare Drehmoment des Zählers möglichst groß sein und durch eine entsprechend starke Bremsung aufgenommen werden soll. Hieraus folgend ist sodann eine geringe Tourenzahl des Zählers von großer Nützlichkeit, um die schädliche Bremsung der Einzelpole zu verringern. Schließlich wird man das Starkstromfeld mit einem großen Luftwege versehen, um die von ihm ausgeübte Bremsung gering zu halten, da man dem Spannungssystem aus verschiedenen Gründen, der möglichst hohen Phasenverschiebung und des geringen Eigenverbrauches wegen, einen möglichst guten Schluß erteilen muß. Stern hat an der gegebenen Stelle den Wert der einzelnen Bremswirkungen des permanenten Magneten, des Starkstrom- und Spannungsfeldes in einem Falle experimentell und ziffernmäßig ermittelt und ist hierdurch zu den Werten

a gleich 97·7
b „ 0·000264
f „ 0·3

gekommen, wobei f ein Maß der Reibung ist, in a die Wirkung des permanenten Magneten und die Bremswirkung des Nebenschlußmagneten, in b diejenige des Hauptstrommagneten enthalten ist. Eine neuere ausführliche

Untersuchung über diesen Punkt, theoretisch und experimentell angestellt, rührt von E. Morck her und ist in seinem Buche „Theorie der Wechselstromzähler nach Ferrarisschem Prinzip und deren Prüfung an ausgeführten Apparaten“, Stuttgart, Ferd. Enke, 1905, niedergelegt.

Dem angewandten Induktionsprinzip entsprechend sind aber diese Apparate weiterhin von Periodenzahl und Kurvenform abhängig, was bei dynamometrischen Meßinstrumenten wiederum entfällt. Was zunächst die Abhängigkeit von der Periodenzahl anlangt, so ist dieser theoretische Nachteil praktisch von geringer Bedeutung, da die Zähler in der Mehrzahl der Fälle andauernd mit ein und derselben Periodenzahl betrieben werden, für die sie von vornherein gebaut sind. Dann ist aber ihre Abhängigkeit von Schwankungen dieser Größe allgemein wenig erheblich, da das Drehmoment direkt mit der Periodenzahl zunimmt, der Spannungsstrom dagegen bei der in diesen Apparaten stets vorhandenen großen Phasenverschiebung im Spannungssystem selbst fast umgekehrt proportional der gleichen Größe ist, wodurch ihr Einfluß praktisch herausfällt. Es bleibt allerdings ein geringer Einfluß dadurch übrig, daß bei verschiedener Periodenzahl auch die Phasenverschiebung des Spannungssystems sich etwas ändert, doch sind diese Änderungen bei den praktisch vorkommenden Schwankungen der Periodenzahl so gering und fallen innerhalb der dem Zähler zugestandenen Fehlergrenzen, daß dieser Einfluß der Periodenzahl bei den neueren Konstruktionen vollkommen zu vernachlässigen ist.

Ein gleiches trifft für die Abhängigkeit von der Kurvenform zu. Selbst bei starken Verzerrungen der Spannungskurve ist der Einfluß auf die Angaben des Zählers nach den praktischen Untersuchungen (s. hierzu dieselbe Studie von Morck) vollkommen außer acht zu lassen.

97. Reibungsverhältnisse und mechanischer Aufbau.

Es bleibt noch der wichtigen Einwirkung der mechanischen Reibung zu gedenken. In diesem Punkte sind die Induktionszähler durch den Fortfall von Stromwender und Bürsten den Gleichstrom-Motorzählern von vornherein bedeutend voraus, und ist dieser Umstand geradezu ausschlaggebend gewesen für die mächtige Entwickelung der Konstruktion und Anwendung dieser Induktionszähler. Es bleibt also lediglich die Luftreibung und die an den Lagern auftretende zu berücksichtigen übrig. Noch mehr wie bei den Gleichstromzählern entfällt hier ein Einfluß der Luftreibung, da es sich um gleichmäßige glatte Oberflächen aufweisende Rotationskörper, als Scheibe oder Trommel ausgeführt, handelt. Aber auch die Lagerreibung ist hier von geringerer Bedeutung, da das Gewicht des umlaufenden Ankers namentlich in den neueren Konstruktionen ein so geringes ist, daß man dieselben ohne besondere Arretiervorrichtung ausführt. Hinsichtlich der mechanischen Ausführung des unteren Spurlagers trifft das bei den Gleichstrom-Motorzählern Gesagte auch hier zu. Es ist lediglich hinsichtlich des unteren Spurlagers des Umstandes zu gedenken, daß man in vielen Fällen den sogenannten „Thomson-Effekt“, d. h. die anziehende oder abstoßende transformatorische Wirkung von Wechselfeldern auf Kurzschlußsysteme, in diesem Falle des Spannungsfeldes auf den Anker zu einer ganzen oder teilweisen Entlastung des unteren Spurlagers benutzt hat. In etwas anderer Weise geschieht dies in den Zählern der Siemens-Schuckert-Werke. Hier wird, was im Folgenden bei der Besprechung ihrer konstruktiven Ausführung noch näher erläutert wird, das untere Lager durch mechanische Kombination mit einem Wechselstrommagneten in ständiger feiner Vibration erhalten, um hierdurch die

fach ausgeführt wurde, entsteht ein homogenes Drehfeld nur unter der Bedingung, daß beide Feldkomponenten genau gleich groß sind und sich in ihrer Gesamtheit zu dem resultierenden Drehfelde zusammensetzen. Sind zunächst beide Felder verschieden groß. so entsteht kein homogenes Drehfeld, sondern ein solches von elliptischer Form, wobei lediglich das durch den der Ellipse eingeschriebenen Kreis bestimmte Drehfeld das nutzbare Drehmoment erzeugt. Das übrigbleibende pulsierende Wechselfeld erzeugt natürlich in der umlaufenden Armatur schädliche Wirbelströme.

Aber selbst bei gleicher Stärke beider Felder treten das nutzbare Drehmoment schwächende Bremswirkungen auf, sobald ein irgendwie erheblicher Teil der Kraftlinien eines einzelnen Teilfeldes in nächster Nähe dieses Feldes seinen Schluß findet, ohne irgendwie das andere Teilfeld zu durchsetzen und sich mit ihm zu dem nutzbaren Drehfelde zu kombinieren. Dies gilt in gleicher Weise für industrielle Mehrphasenmotoren wie Induktionszähler. Man vermeidet diese schädlichen Einzelfelder im ersteren Falle wie bekannt durch möglichst gleichmäßige Ausbildung des induzierenden Teiles, des Stators. Bei dem Zähler ist aus mechanischen und konstruktiven Rücksichten diese Form des Mehrphasenmotors nicht nachzuahmen, und treten daher diese Teilfelder mehr oder minder stark tatsächlich auf. Von vornherein ist zu ihrer Unterdrückung oder Schwächung die Form der Trommel- oder Kurzschlußanker günstiger als die Scheibe, da bei letzterer unter Verwendung der namentlich anfänglich wie z. B. bei dem Blathy-Zähler benutzten sehr kurzen und vollkommen geschlossenen Magnetsysteme nur die Streufelder das wirksame Drehmoment bilden mußten. Man bevorzugt aus diesem Grunde neuerdings die Anbringung der Strom- und Spannungswickelung auf demselben Eisenkern, um die Felder in möglichst großem Umfange miteinander in Wechselwirkung zu bringen. Ist diese schädliche Bremsung des Strom- und Spannungssystemes nicht vollkommen zu vermeiden, so lassen sich doch die Verhältnisse konstruktiv so treffen (siehe hierzu Stern, ETZ. 1902, Heft 35), daß ihre Wirkung auf die Zählerangaben praktisch vernachlässigt werden kann. Hierzu sind als nützliche Punkte zu beachten, daß erstlich die hauptsächliche Bremsung durch den permanenten Magneten möglichst kräftig ausfallen, d. h. daß das nutzbare Drehmoment des Zählers möglichst groß sein und durch eine entsprechend starke Bremsung aufgenommen werden soll. Hieraus folgend ist sodann eine geringe Tourenzahl des Zählers von großer Nützlichkeit, um die schädliche Bremsung der Einzelpole zu verringern. Schließlich wird man das Starkstromfeld mit einem großen Luftwege versehen, um die von ihm ausgeübte Bremsung gering zu halten, da man dem Spannungssystem aus verschiedenen Gründen, der möglichst hohen Phasenverschiebung und des geringen Eigenverbrauches wegen, einen möglichst guten Schluß erteilen muß. Stern hat an der gegebenen Stelle den Wert der einzelnen Bremswirkungen des permanenten Magneten, des Starkstrom- und Spannungsfeldes in einem Falle experimentell und ziffernmäßig ermittelt und ist hierdurch zu den Werten

a gleich 97·7
b „ 0·000264
f „ 0·3

gekommen, wobei f ein Maß der Reibung ist, in a die Wirkung des permanenten Magneten und die Bremswirkung des Nebenschlußmagneten, in b diejenige des Hauptstrommagneten enthalten ist. Eine neuere ausführliche

handen ist, angebrachtes kleines Eisenstückchen durch den Bremsmagneten bei ausgeschaltetem Strom in einer bestimmten Stellung festhalten zu lassen.

In dieser Weise ausgeführt, wird die Meßgenauigkeit der FERRARIS-Zähler praktisch auf die gleiche Höhe wie die der Gleichstrom-Motorzähler gebracht, und unterscheiden sich erstere dann natürlich in rein konstruktiver mechanischer Beziehung sehr vorteilhaft von denselben. Ursprünglich ergab sich durch die komplizierten Wickelungs- und Schaltmethoden, um die gewünschte Phasenverschiebung von 90° zu erzielen, nicht nur kein geringerer Herstellungspreis als der des gewöhnlichen THOMSON-Zählers, sondern oft noch ein höherer. Man führte darum — wie dies auch noch heute seitens verschiedener Firmen geschieht — besonders billige für nicht induktive Belastung bestimmte, d. h. nicht auf genau 90° abgeglichene Induktionszähler aus, die namentlich bei kleineren Lichtanschlüssen sehr brauchbar sind. Die Praxis und die auch auf diesem Gebiete der Induktionszähler heute sehr starke Konkurrenz brachten es aber mit sich, daß die teureren und komplizierteren Typen mehr und mehr ausgemerzt wurden, und an ihrer Stelle nur die einfachsten mechanischen Ausführungen übrig blieben, und drückten den Herstellungspreis auch dieser bei jeder Phasenverschiebung genau messenden Apparate so herab, daß derselbe sich nicht teurer stellt wie die THOMSON-Type, und daß heute nur eine geringe Preisdifferenz zwischen den als genaue Wattmeter abgeglichenen und den nur für überwiegend induktionsfreie Belastung verwendbaren Induktionszählern vorhanden ist.

Hinsichtlich der verschiedenen mechanischen Ausführung ist man daher fast ausschließlich zur Anwendung der Scheibe als Kurzschlußanker übergegangen. Wohl ist der Trommelanker zur Erzielung eines großen Drehmomentes und Vermeidung der schädlichen Bremswirkungen von Strom- und Spannungssystem vorzuziehen. Es ist aber schwieriger, an ihm die magnetische Bremsung durch permanente Magnete anzubringen und macht meistens, wie bei dem älteren SIEMENSschen FERRARIS-Zähler, eine besondere Bremsscheibe nötig. Der Gesamtaufbau des Zählers ist entschieden komplizierter und eine Reparatur viel schwieriger vorzunehmen, als bei Zählern mit Scheibenanker. Diese Ankerform wird daher heute fast ausschließlich verwendet, als Material meistens Aluminium, da auch mit diesem Metall bei gegebenem Gewicht das nutzbare Drehmoment groß genug ist.

Ebenfalls aus Gründen der Einfachheit, bequemeren Montage und leichteren konstruktiven Ausführung ist man heute auf den Aufbau des wirksamen Triebsystemes aus durch Stanzung hergestellten Wechselstrommagneten übergegangen. Um eine möglichst innige Verkettung von Starkstrom- und Spannungsfeld zu erzielen, verwendet man vorzugsweise einen dreischenkligen Triebkern mit gemeinsamem Joch, gegebenenfalls mit besonderem magnetischem Schlußstück für den Spannungsmagneten. Das Gehäuse wird hier im Gegensatz zu den Gleichstrom-Motorzählern meist aus kräftigem Eisenguß ausgeführt, da die gut geschlossenen kräftigen magnetischen Wechselfelder weit weniger einem Einfluß fremder Magnetfelder ausgesetzt sind, als dies bei den Gleichstromzählern der Fall ist.

Gegen letztere besitzen die Induktionszähler schließlich den weiteren praktisch sehr bedeutsamen Vorteil eines geringen Eigenverbrauches im Spannungssystem. Während der Eigenverbrauch der Gleichstromzähler 1·5 bis 2 Watt pro 110 Volt beträgt, beläuft sich derselbe bei Wechselstromzählern höchstens auf 1·5 bis auf 1 Watt und darunter.

Was nun die verschiedenen praktischen Ausführungsformen des Induktionszählers anlangt, so lassen sich dieselben nach Ankerform und Verlauf des magnetischen Feldes usw. in mannigfacher Weise einteilen. Als wichtigstes Merkmal dürften aber die verschiedenen für die Abgleichung der Zähler auf genau 90° Phasenverschiebung bei den einzelnen Konstruktionen angewendeten Methoden zu betrachten sein. Hat man daher allgemein zwischen Induktionszählern mit nur teilweiser und vollständiger Abgleichung zu unterscheiden, d. h. zwischen solchen für nur induktionsfreie und jede beliebige Art von Belastung bestimmten, so können letztere weiterhin je nach der Schaltung in vier Gruppen eingeteilt werden, wie dies im Folgenden auch geschehen ist.

98. Einteilung der Induktionszähler.

Praktische Ausführungsformen.

Zähler für induktionslose Belastung, d. h. also praktisch für Lichtbetrieb wurden zu Beginn der Herstellung von Induktionszählern überwiegend

99. Zähler für induktionsfreie Belastung.



Fig. 86.



Fig. 87.

fabriziert. Als Beispiel ist der von B l a t h y erfundene Wechselstromzähler zu erwähnen, der s. Z. in Deutschland von der H e l i o s - E l e k t r i z i t ä t s - A k t i e n - G e s e l l s c h a f t, danach bis heute noch von der Firma G a n z & C o., B u d a p e s t, hergestellt wird. Sodann bauen noch heute verschiedene Firmen außer ihren für jede Art Belastung bestimmten Zählern noch solche für n u r induktionsfreie, wie ein solcher in Fig. 86 und 87 in Form des einfachen Wechselstromzählers der I s a r i a w e r k e, M ü n c h e n, abgebildet ist. Gleich einfache Zähler für induktionsfreie Belastung werden außerdem von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft und verschiedenen anderen Firmen hergestellt. Der etwas niedrigere Preis dieser Apparate ergibt sich in der Hauptsache aus der einfacheren Eichung, da im übrigen die Kosten für Material und Herstellung die gleichen sein dürften.

Zähler für beliebige induktive Belastung.

Diese einfachen Zähler wurden anfänglich für induktive Belastung benutzt, bis die Notwendigkeit der genauen Phasenverschiebung um 90° zwischen den wirksamen Feldern erkannt wurde. Nachdem zu diesem Zwecke mehr oder minder komplizierte Schaltungen erfunden und angewendet wurden, kam T h e i l e r in dem nach ihm benannten Zähler auf die einfache Schaltung des Zählers als gewöhnliches Wattmeter zurück und wies

100. Landis & Gyr.

nach, daß man durch entsprechende Anordnung von Stark- und Schwachstromsystem und unter Benutzung der Rückwirkung der in dem Kurzschlußanker erzeugten Wirbelströme auf das Spannungsfeld selbst den angestrebten Zweck in sehr einfacher Weise erzielen kann. Wesentlich hierfür ist, daß das Spannungsmagnetsystem guten magnetischen Schluß besitzt und zu der Ankerscheibe genau symmetrisch angeordnet ist — d. h. abgesehen von der eventuell dem Spannungssystem erteilten kleinen Verschiebung zum Ausgleich der Reibungskompensation —, um die Rückwirkung der Induktionsströme voll aufnehmen zu können. In teilweiser magnetischer Verkettung zu dieser Spannungsspule, jedoch mit großem Luftzwischenraum, werden die den Starkstrom führenden Magnete angeordnet, deren Feld also annähernd

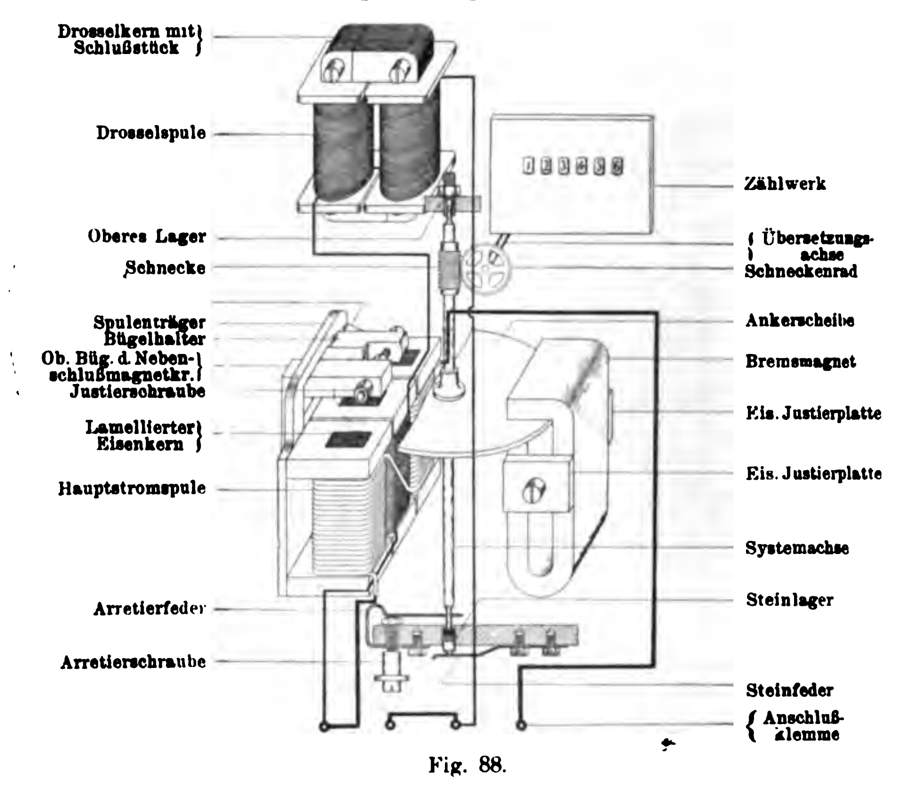


Fig. 88.

mit dem Strom in Phase ist. Wenngleich daher der die Spannungsspule erregende Strom selbst stets eine geringere Phasenverschiebung wie 90° gegen die Netzspannung aufweist, so gelingt es doch in der angegebenen Weise das resultierende Spannungsfeld gegen dasjenige der Starkstrommagnete um 90°, ja sogar mehr wie 90° zu verschieben, obgleich dies von keinem Nutzen ist. Diese von Theiler angegebene Konstruktion wurde und wird noch heute in der Schweiz von der Firma Landis & Gyr, Zug, hergestellt, deren Einphasenzähler für induktionsfreie und induktive Belastung Fig. 88 in schematischer Darstellung, in Fig. 89 in der äußeren Ausführung mit abgehobenem Schutzkasten wiedergegeben ist. Wie aus Fig. 88 klar zu ersehen ist, wird das magnetische Dreh- oder Wanderfeld von drei nebeneinander angeordneten Wechselstrommagneten erzeugt, von denen der mittlere von der Spannung erregte durch ein besonderes magnetisches Joch gut geschlossen ist. Zwischen Joch und oberer Polfläche rotiert

die Aluminiumscheibe. Die Spannungsspule liegt in Reihe mit der besonderen Drosselspule direkt parallel zur Netzspannung an. Die die Spannungsspule zu beiden Seiten umgebenden Starkstrompole führen hintereinandergeschaltet den Verbrauchsstrom, und schließen sich die von ihnen erzeugten magnetischen Linien zum übergroßen Teil in Luft, zum Teil in magnetischem Nebenschluß durch das Spannungssystem. Die in üblicher Weise gelagerte

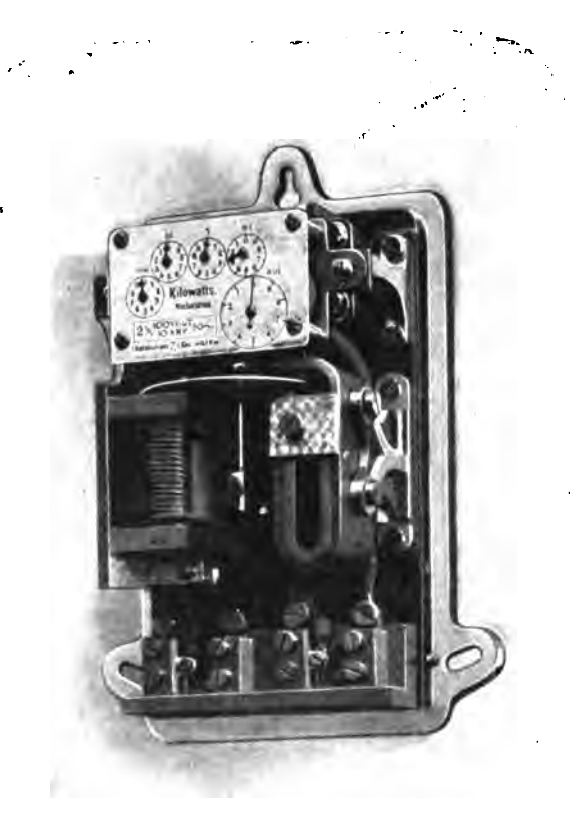


Fig. 89.

Ankerscheibe wird durch einen permanenten Magneten gebremst und überträgt ihre Drehungen durch Schnecke und Zahnrad auf ein Zählwerk mit springenden Ziffern, oder auf Wunsch auf ein gewöhnliches Zeigerzählwerk.

101. Theiler-zähler der Union El. Ges.

Der THEILER-Zähler wurde früher von der Union-Elektrizitätsgesellschaft, die die THEILER-Patente für Deutschland erworben hatte, hergestellt und ist dieser frühere Unionzähler aus den Fig. 90 bis 93 klar zu ersehen. Es waren zwei Ankerscheiben vorgesehen, welche sowohl von dem magnetisch kurzgeschlossenen Spannungssystem, wie auch von den beiden Starkstromspulen in der aus Fig. 90, 91 ersichtlichen Form doppelpolig beeinflußt wurden. Die Schaltung war hierbei genau die gleiche wie bei dem von LANDIS & GYR hergestellten Zähler. Zusammenbau und Einzelteile sind in Fig. 92, 93 wiedergegeben, wobei *a* das Gehäuse, *b* den Uhrwerksträger, *c* den Spulenträger für die Spannungsspulen *e* und die beiden

Starkstromspulen d darstellt, f ist das die beiden Ankerscheiben umgreifende und die Spannungsspule magnetisch schließende Joch, g die Doppelarmatur, h die in ihrem Abstand von beiden Hälften regulierbare Drosselspule, k das Klemmstück und i der Bremsmagnet.

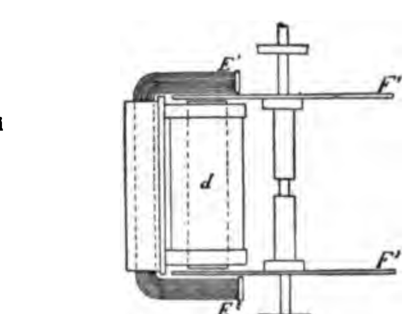


Fig. 90.

102. Ferranti Ltd.

Dieselbe einfache elektrische Schaltung, identisch mit der des gewöhnlichen dynamometrischen Wattmeters, finden wir in dem FERRANTI-Zähler, herge-

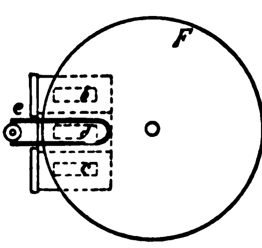


Fig. 91.



Fig. 92.

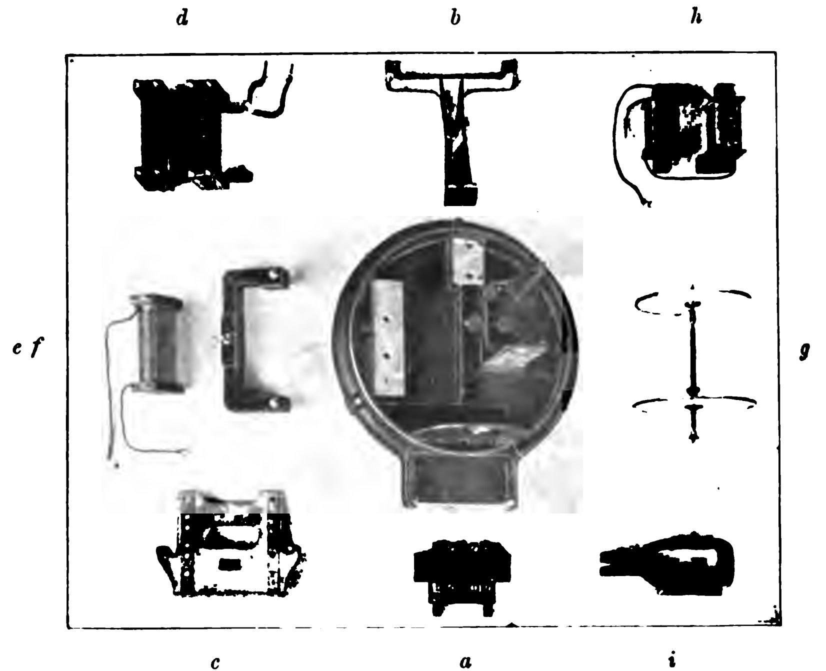


Fig. 93. k

stellt von der Ferranti Ltd., Hollinwood, Lancashire. Auch hier bildet eine leichte drehbare Aluminiumscheibe das bewegliche System, welches von einem doppelten Magnetsystem induziert und in Bewegung ge-

setzt wird. Der untere von der Spannung erregte Topfmagnet besteht aus einem mit zwei Polstücken, siehe Fig. 95 b, versehenen Eisenkern, der von der direkt an die Spannung angeschlossenen Nebenschlußspule *Sh. C.* erregt wird. Sein unteres Ende findet den magnetischen Rückschluß durch das die

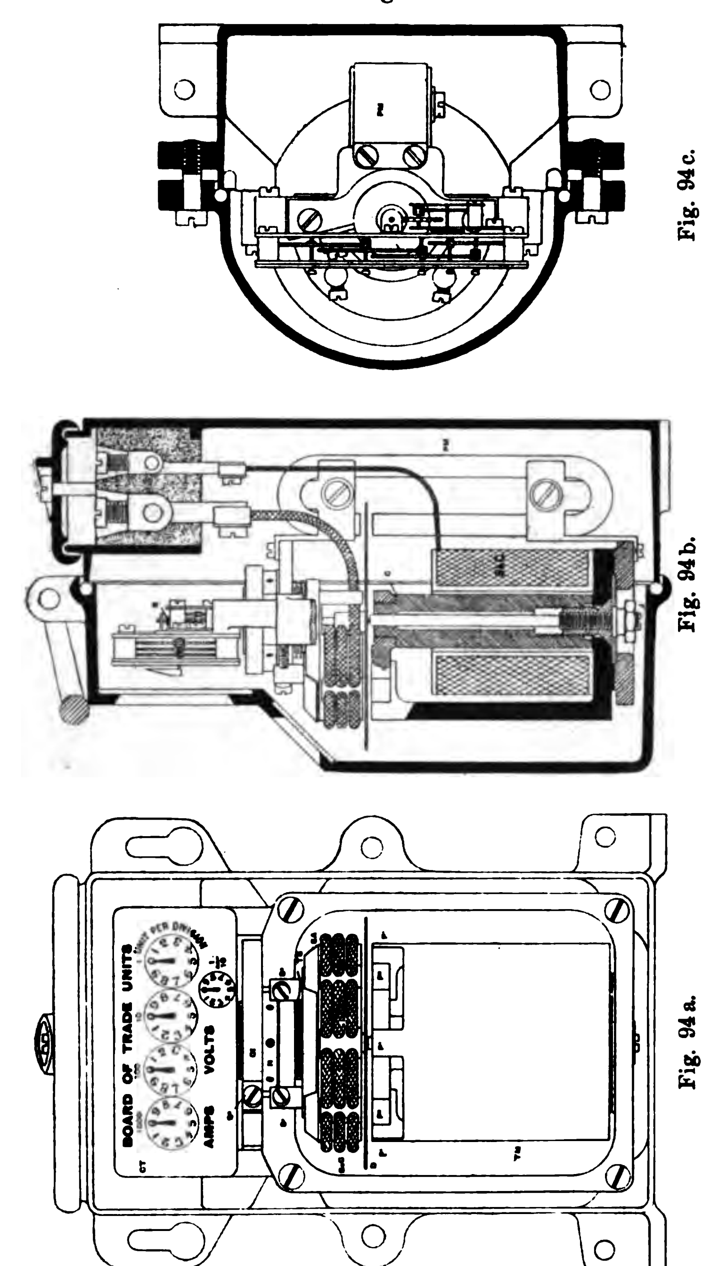


Fig. 94 c.

Fig. 94 b.

Fig. 94 a.

Erregerspule umgebende Röhrenstück, siehe Fig. 95 a, welches mit drei Polvorsprüngen ausgerüstet ist. Wie Fig. 94 a und b erkennen lassen, sind die Polstücke des inneren Eisenkernes und äußeren Rückschlusses ineinander geschoben, erzeugen also magnetische Folgepole. Oberhalb der Aluminiumscheibe befindet sich die von dem Starkstrom erregte Armatur, die mit einer

Reihe von tiefen Nuten versehen ist und konzentrisch zu dem unteren Topfmagneten und seinen Polvorsprüngen so angeordnet wird, daß je eine Nut gerade über einem der Polvorsprünge zu liegen kommt. Es bezweckt dies, zwischen den magnetischen Linien des Nebenschluß- und Starkstrommagneten

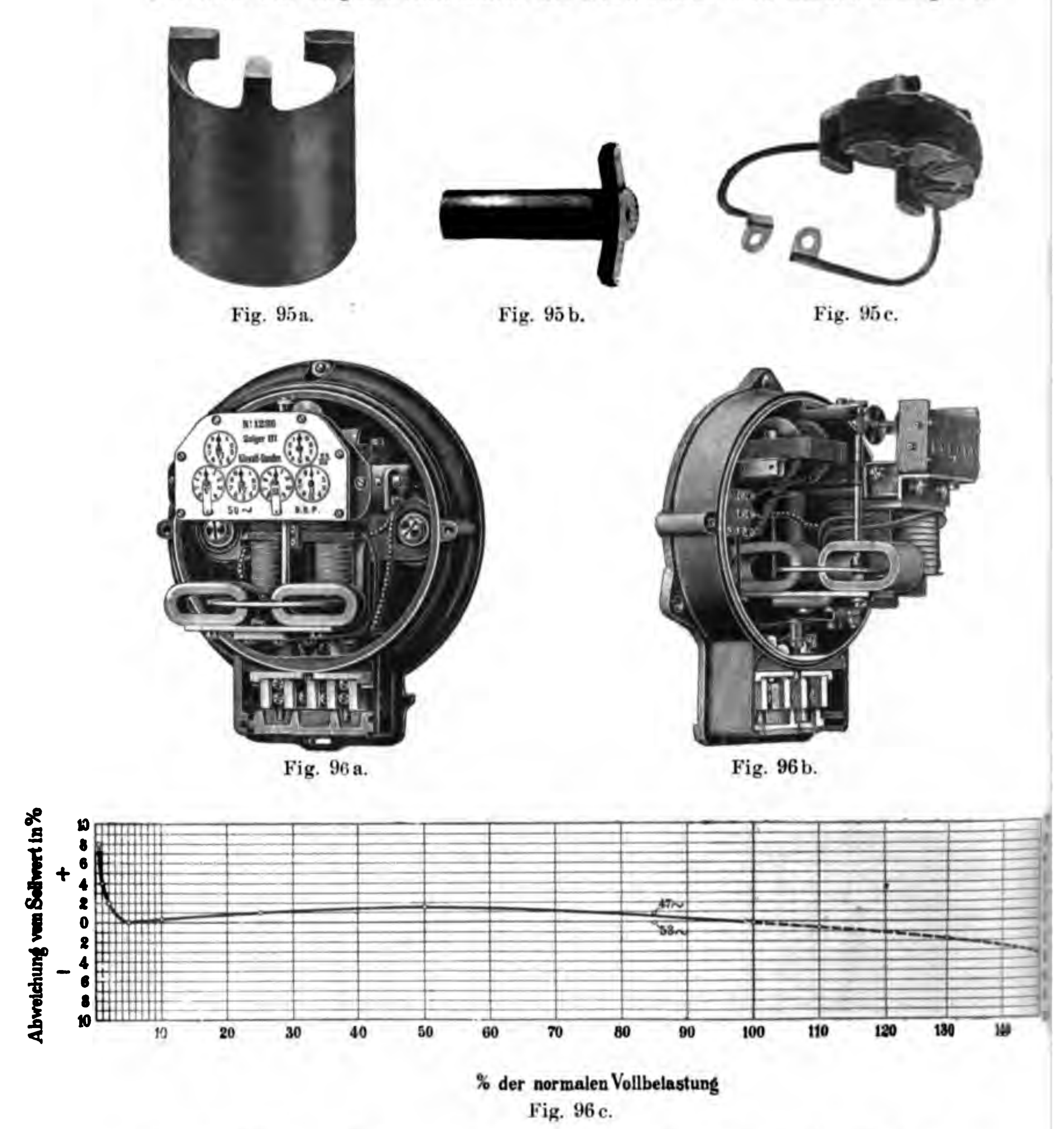


Fig. 95a. Fig. 95b. Fig. 95c.

Fig. 96a. Fig. 96b.

Fig. 96c.

die gewünschte Verkettung zu erzeugen. Die magnetisch sehr gut geschlossene Nebenschlußspule erfährt von vornherein eine sehr starke Phasenverschiebung, und wird der von ihr erzeugte Kraftfluß durch die Wirbelströme in der Scheibe wie in dem eigenen massiven Körper des Magneten auf genau 90° dem magnetischen Felde des Starkstromsystemes gegenüber verschoben. Zur Kompensation der Reibung wird das obere Starkstrom-

system um einen gewissen Betrag entgegengesetzt dem Drehungssinn der Armatur verschoben, um durch die hierdurch hervorgerufene magnetische Unsymmetrie dem Anker allein unter Einwirkung der Spannungsspule ein kleines zusätzliches Drehmoment zu erteilen. Diese schwache Verdrehung des Starkstromsystemes ist durch die Schrauben S_1, S_2 genau zu regulieren. Der Umlauf der Ankerscheibe wird durch die permanenten Magnete *PM* abgebremst. Der Zähler ist äußerlich sehr stark konstruiert und mit einem Zifferblatt mit gewöhnlichen, neuerdings auch mit springenden Ziffern versehen.

103. A.-G. Mix & Genest.

In gleicher Weise verzichtet die Firma A.-G. Mix & Genest, Berlin, in ihrem in Fig. 96 wiedergegebenen Induktionszähler auf Anwendung besonderer Schaltungen zur Erzielung von 90° Phasenverschiebung erzeugt

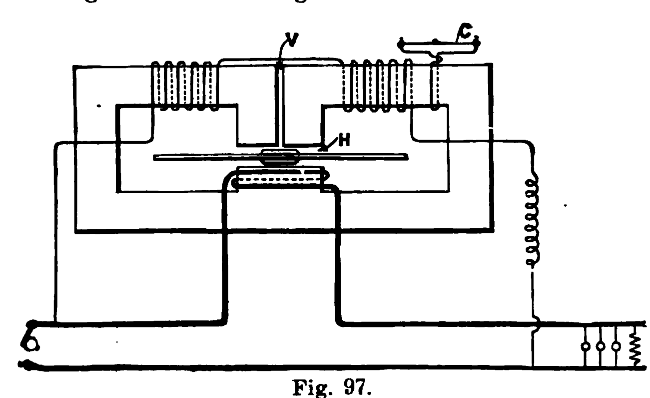


Fig. 97.

dieselbe vielmehr lediglich durch geeignete Anordnung und Bemessung der Wickelungen, der induktiven und ohmischen Widerstände, sowie der Eisen- und Metallmassen der Felder und des Rotors. Fig. 96c gibt eine Fehlerkurve des Zählers wieder.

104. Westinghouse El. Mfg. Co.

Der nach ähnlichen Prinzipien hinsichtlich der Verschiebung der Phase des Spannungsfeldes um genau eine Viertelperiode entworfene Zähler der Westinghouse-Gesellschaft, in Fig. 97 und 98 im Diagramm wie in der mechanischen Ausführung wiedergegeben, zeigt eine eigentümliche Gestaltung und Kombination von Stark- und Spannungsstromkreis. Das Spannungsfeld wird durch zwei hintereinander geschaltete Spulen erzeugt, die einen fast vollständig geschlossenen Eisenkern fortlaufend magnetisieren. Der Eisenkern ist jedoch in der aus Fig. 97 ersichtlichen Weise zwischen beiden Spannungsspulen durch einen schmalen Luftzwischenraum unterbrochen und bildet an diesen Stellen besondere Pole aus. Diese, oberhalb der Armatur angeordnet, stehen dem Starkstrompol gerade unterhalb derselben gegenüber, und die so bewirkte Verkettung beider Felder erzeugt ein magnetisches Wanderfeld. Zur Kompensation der Reibung sind auf den Spannungsspulen Kurzschlußwindungen angebracht. In den Spannungskreis ist außer den Erregerspulen noch eine Drosselspule eingeschaltet.

105. Felten & Guilleaume-Lahmeyer-Werke.

Wesentlich anders ist der für induktive und induktionslose Belastung gebaute Zähler der Felten & Guilleaume-Lahmeyer-Werke A.-G. Ähnlich dem Gleichstrom-Wattstundenzähler derselben Firma kommt als Kurzschlußanker ein mit einer Kurzschlußwindung aus Kupfer vollständig bedeckter ringförmiger Anker aus Eisen zur Anwendung, s. Fig. 99 und 100, der einmal von der an der Rückplatte des Zählers angebrachten Starkstromspule in Richtung seines Durchmessers senkrecht zur Rückwand magnetisiert wird. Senkrecht

zu dieser Magnetisierung unterliegt er weiter der Einwirkung der einen Spannungswickelung J_1, welche mit dem Starkstrom zusammen bei der zwischen beiden herrschenden starken Phasenverschiebung ein Drehfeld liefert. Die vollkommene Verschiebung der Feldphase im Spannungssystem bringt ein in Reihe mit der Spannungsspule J_1 befindliches zweites Magnetsystem J_2, welches in Kombination mit dem Starkstromsystem ein der ersteren entgegengesetztes Drehfeld hervorzurufen bestrebt ist. Durch ge-

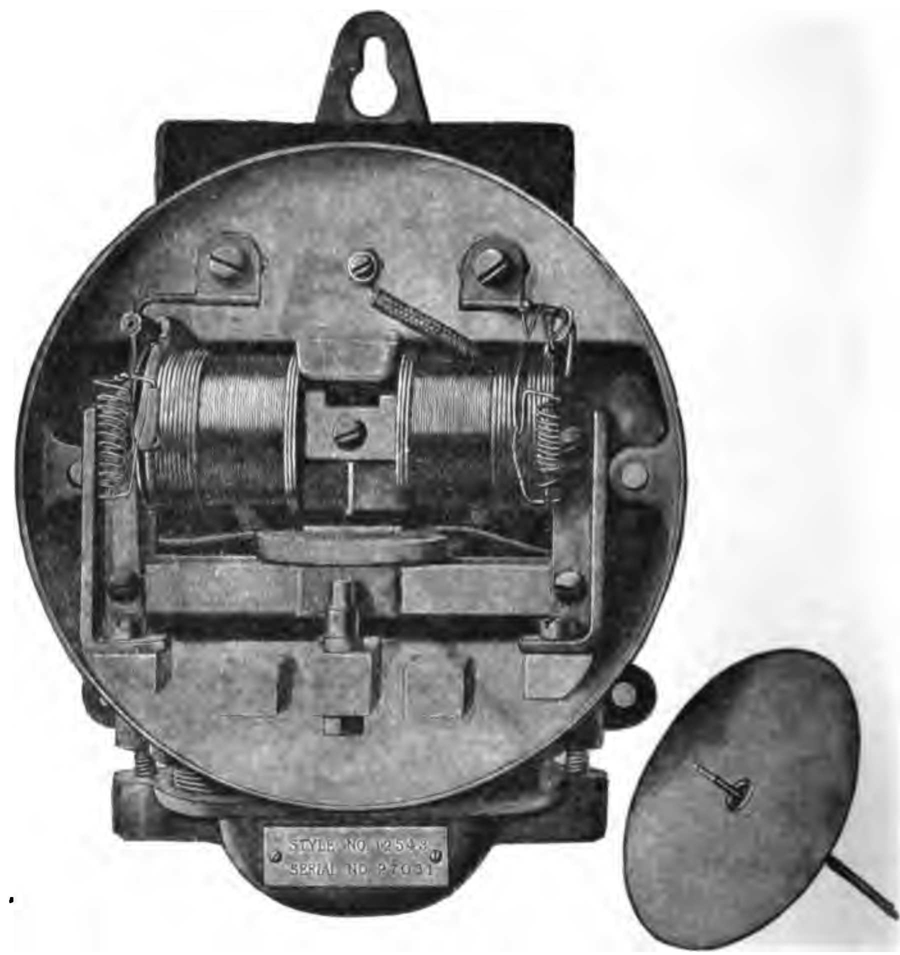


Fig. 98.

eignete räumliche Entfernung und elektrische Dimensionierung, nötigenfalls noch durch einen in Reihe mit den beiden Spannungsmagneten geschalteten induktionslosen Widerstand wird hierdurch die Phase des resultierenden Spannungsfeldes auf genau 90° gegenüber dem Starkstromsystem gebracht. Fig. 101 zeigt die definitive Ausführung des Zählers bei abgenommener Schutzkappe. Durch die Nebenschlußmagnete oberhalb des Ankers soll ein leichter Zug nach oben auf denselben ausgeübt werden, um hierdurch die Reibung im unteren Spurlager zu vermindern und ein leichteres Angehen des Zählers zu bewirken.

Die bei den bisher betrachteten Konstruktionen benutzte Rückwirkung der Kurzschlußströme des Ankers zur vollständigen Verschiebung des resul-

tierenden Spannungsfeldes um 90° läßt sich natürlich auch durch Kurzschlußwindungen erzielen, die auf den Strom- und Spannungsspulen fest angebracht werden. Von diesem Mittel ist ausgiebiger Gebrauch gemacht worden, und

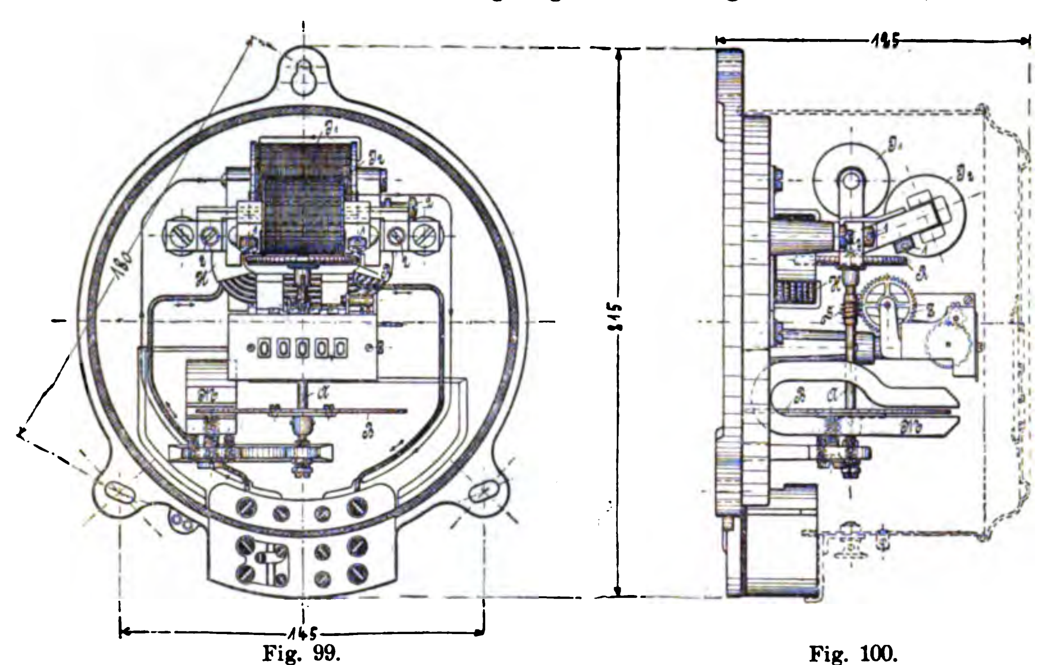


Fig. 99. Fig. 100.

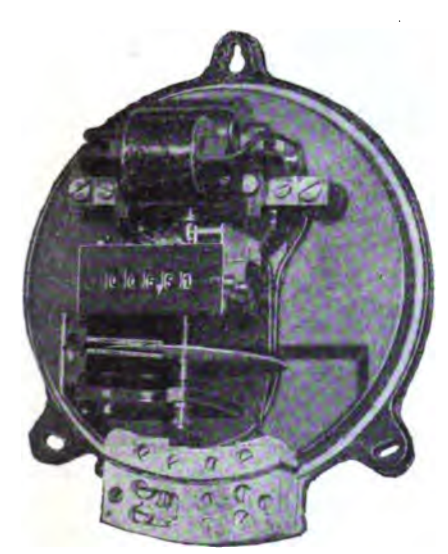


Fig. 101.

ist dasselbe z. B. auch bei den bereits beschriebenen FERRANTI-Zählern mit benutzt durch teilweise massive Ausführung der Triebmagnete.

106. Aron-Induktionszähler. Besondere Kurzschlußwindungen auf dem Spannungsmagnet verwendet zu diesem Zweck ARON in seinem Fig. 102 a b und c dargestellten Einphasenzähler.

Es wird hierbei die Aluminiumscheibe *a* durch das Nebenschlußsystem, aus Eisenkern *b*, Erregerspulen *c* und Schlußstück *e* an der anderen Seite der Ankerscheibe bestehend, induziert. Die Phasenverschiebung von genau 90° wird durch die einen unvollkommenen magnetischen Schluß bildende Brücke *g* und einige auf dem Nebenschlußmagneten angebrachte Kurzschlußwindungen *f* erzielt. Die Brücke trägt weiterhin die Starkstromwickelung *h*, so daß auch hier ein dreiteiliger Triebkern vorhanden ist. Die Bremsung erfolgt durch den permanenten Magneten *i*, der in dem Eisenstück *k*, ebenfalls an der anderen Seite der Ankerscheibe, seinen magnetischen Schluß findet.

107. Blathy-zähler. Die älteste Konstruktion und zweifellos die einfachste eines Induktionsmotorzählers ist in dem von BLATHY angegebenen und von der Firma

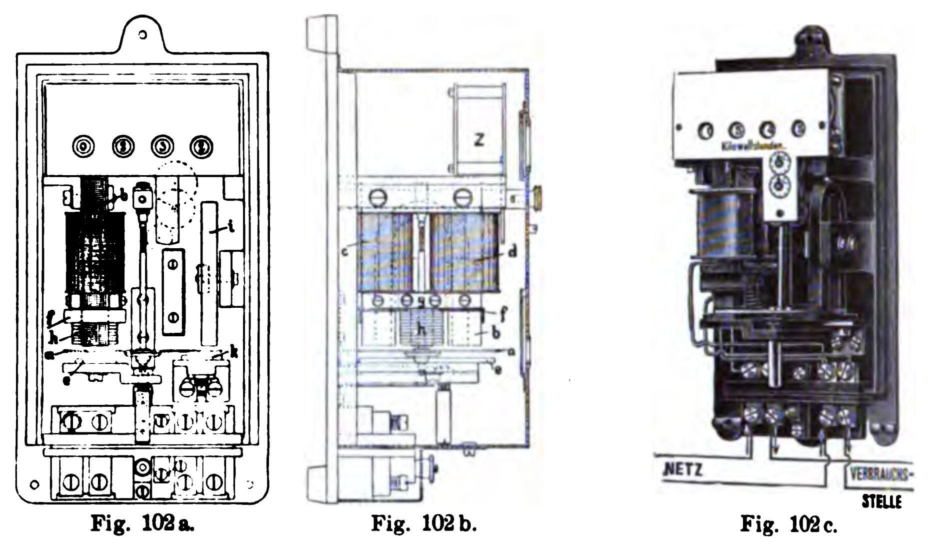


Fig. 102a. Fig. 102b. Fig. 102c.

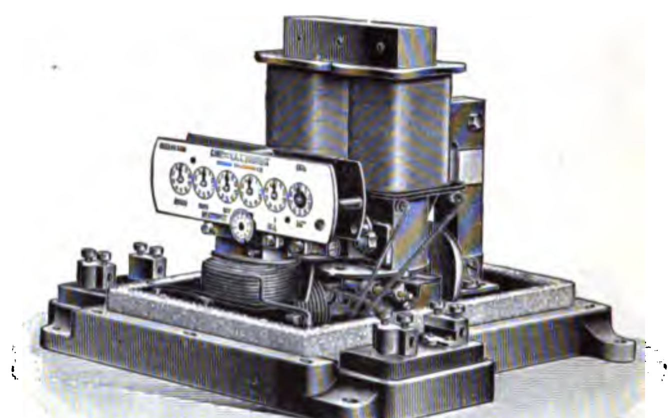
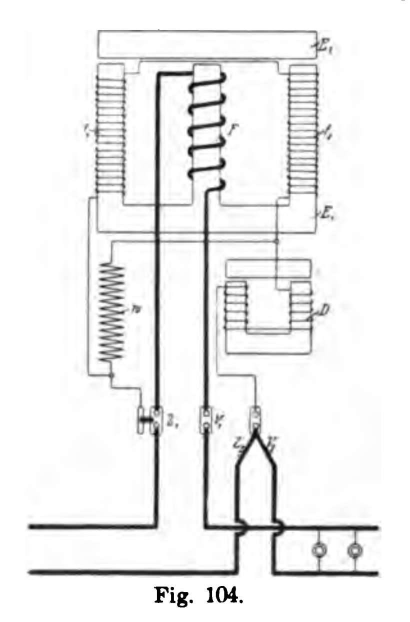

Fig. 103a.


Fig. 103b.

Ganz & Co., Budapest, vertriebenen Induktionszähler verkörpert, wie derselbe in Fig. 103a und b in der Gesamtkonstruktion, offen und geschlossen, abgebildet ist. Der Zähler, mit einer Scheibenarmatur ausgerüstet, besitzt drei auf dieselbe einwirkende Magnetsysteme, das Hauptfeld mit einem reichlich großen Luftspalt für die Scheibenarmatur und durch mehrere starke vom Hauptstrom durchflossene Windungen erregt, das hufeisenförmige Spannungsmagnetsystem, durch zwei dünndrähtige Spulen erregt, und den aus einer Anzahl Stahllamellen zusammengesetzten Bremsmagnet. Die Schaltung ist die denkar einfachste des gewöhnlichen elektrodynamischen Wattmeters, die Spannungsspulen direkt an die Netzspannung angeschlossen. Anfänglich war kein Wert auf genaue Abgleichung der Phasenverschiebung im Spannungssystem auf 90° gelegt. Demzufolge war der Zähler vorzugsweise für Glühlichtbeleuchtung brauchbar, da sich bei stark induktiver Belastung unzulässige Abweichungen zwischen den Angaben des Zählers und den tatsächlich verbrauchten Watts herausstellen. Neuerdings ist an der der Ankerscheibe zugewendeten Fläche des unterhalb derseben angebrachten magnetischen Schlußstückes des Spannungsmagneten ein Kupferblech verschiebbar angeordnet, um hierdurch die Anlaufsempfindlichkeit zu erhöhen. Schon bald nach der praktischen Ingebrauchnahme des Zählers, d. h. zu Beginn der 90er Jahre wurde er jedoch als genaues Wattmeter abgeglichen und zwar durch geeignete Dimensionierung des Spannungsfeldes, wobei die Streuung desselben die ausschlaggebende Rolle spielte. Die genaue Einregelung erfolgt durch eine auf dem Hauptstrommagneten angebrachte Kurzschlußwindung.

108. Allgem. Elektr.-Gesellsch.

Den Zählern der zweiten praktisch sehr wichtigen Gruppe ist die Parallelschaltung von induktionsfreiem Widerstand zur Spannungsspule zwecks Verschiebung des das Spannungsfeld erzeugenden Stromes um genau 90° gegenüber dem Hauptstromfelde eigentümlich. Dies ebenso vollkommene wie einfache Mittel wurde von Hummel 1895 (DRP. 98897) angegeben und wird noch heute von einer Anzahl Firmen in mehr oder minder abgeänderter Form ausgeführt. So baut die A.E.G. in den letzten Jahren ihre Induktionszähler in einer Form und Schaltung, die als eine Vereinigung des konstruktiven Aufbaus des Theiler-Zählers und der Schaltung von Hummel gelten kann. Wie aus Fig. 104, 105, 106 ersichtlich, besteht auch hier das Antriebsmagnetsystem aus einem dreizinkigen Eisenkern, welcher entweder in dem mittleren Teile die Starkstromwickelung und auf den beiden äußeren Zinken die erregende Spannungsspule trägt, oder in neuerer Ausführungsform nur an der einen Eisenzinke eine Spannungsspule, während die andere mit einer kombinierten Haupt- und Spannungswickelung bedeckt ist. Durch eine entsprechend ausgebildete Messingarmatur wird parallel zu den drei Polebenen des dreizinkigen Eisenkernes oberhalb der Ankerscheibe ein magnetisches Schlußstück gehalten. Der Spannungsstrom


Fig. 104.

verläuft, von dem eintretenden Starkstromleiter abzweigend, dann sich in die Spannungsspule und einen zu ihr parallel geschalteten induktionslosen

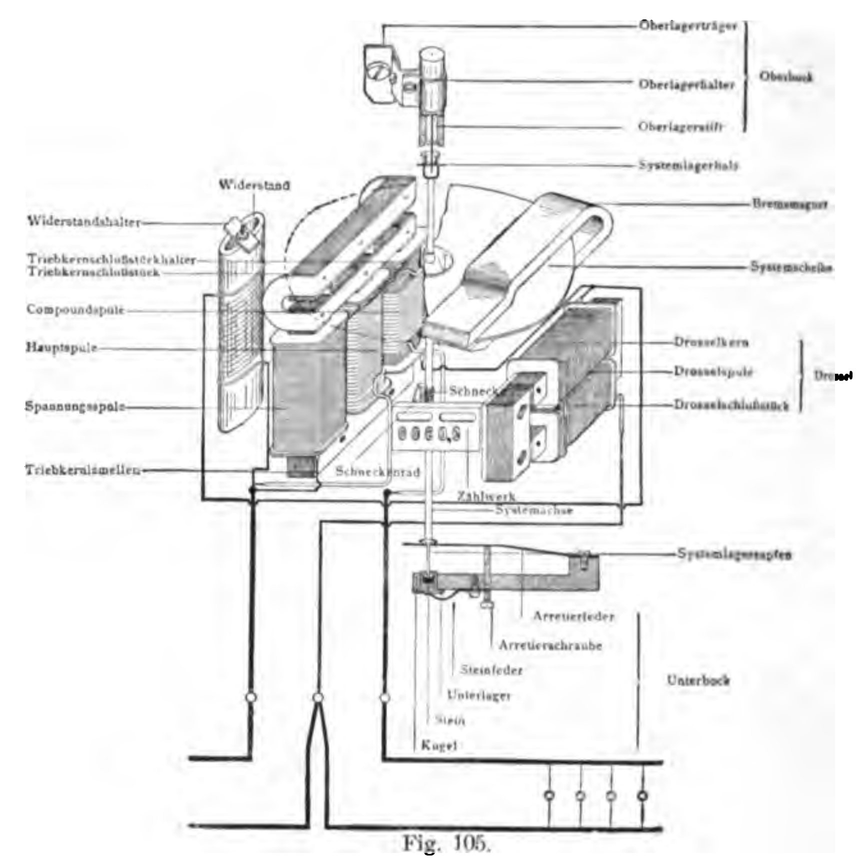


Fig. 105.

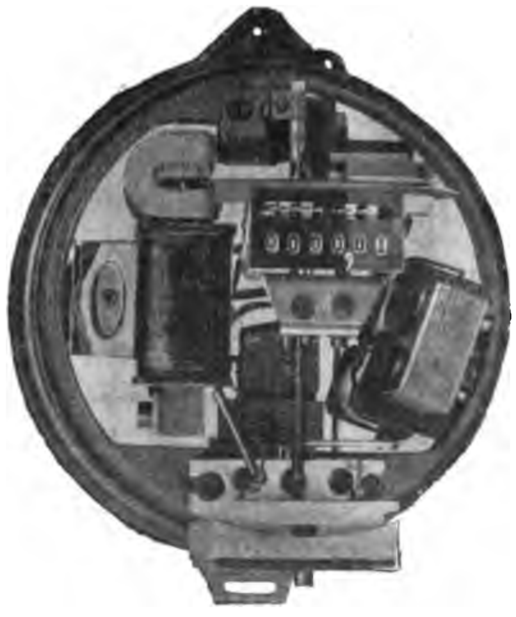


Fig. 106.

Widerstand verzweigend, danach aus beiden Zweigen wieder zusammenfließend, durch die regulierbare Drosselspule zum anderen Pole. Ein an eine von der Spannung erregte Zinke geklemmtes Eisenstück ruft das zum Ausgleich der Reibung zusätzliche Drehmoment hervor, ein auf der Ankerscheibe befindliches Eisenstückchen dient der Leerlaufsverhütung. Die mechanische Ausführung geht aus den Fig. 105 und 106 klar hervor und stimmt in der Lagerkonstruktion, dem Zählwerk sowie Gehäuse mit den entsprechenden Konstruktionsteilen der bereits beschriebenen Gleichstrommotorzähler derselben Firma überein. Mit Weglassung

von Drosselspule und induktionsfreiem Nebenschluß wird der Zähler zu einem etwas geringeren Preise für induktionsfreie Belastung geliefert.

109. Siemens-Schuckert Werke.

Auch dem SIEMENS-SCHUCKERT-Zähler ist ein dreiteiliger Eisenkern eigentümlich, jedoch mit dem Unterschiede, daß derselbe auf den beiden äußeren Zinken die Starkstromwickelung, auf der mittleren die Spannungswickelung sowie zwei Zusatzwickelungen zur Erzeugung von 90° trägt, siehe Fig. 107, 108 und 109. Die Phasenverschiebung im Nebenschlußkreise wird hier durch Parallelschalten eines zum Teil induktiven und induktionslosen Widerstandes zu einem Teil der mittleren Spannungsspule bewirkt, siehe Fig. 109. Durch Regulierung an dem induktionslosen Widerstande *V* erzielt

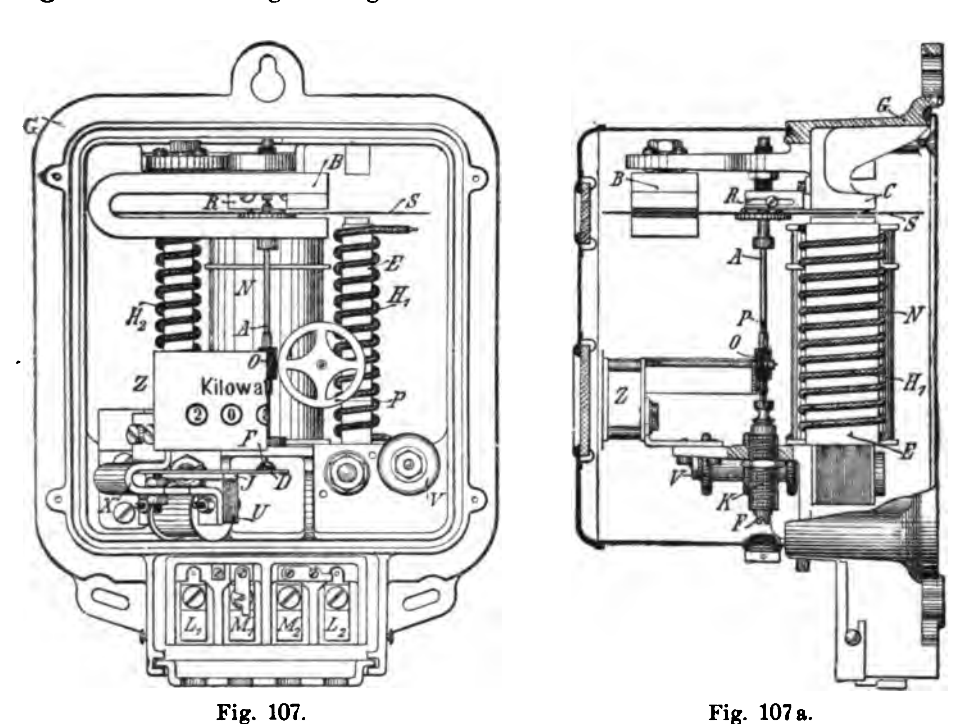


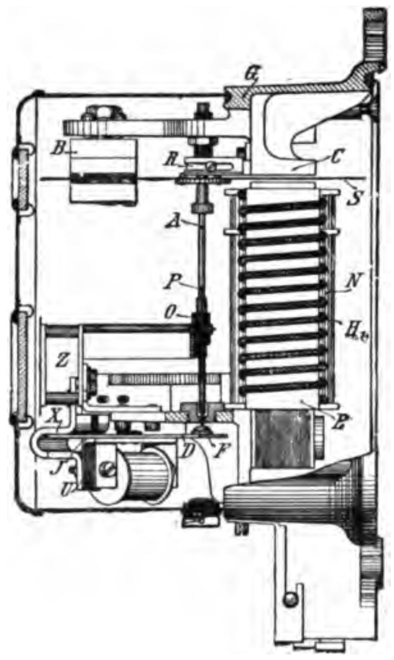
Fig. 107. Fig. 107a.

man leicht die genaue Einstellung auf 90°. Während das obere Halslager in ähnlicher Weise wie bei den THOMSON-Zählern derselben Firma ausgeführt wird, wird das untere Spurlager sowohl in gleicher Weise wie bei den Gleichstromzählern, wie auch mittelst des von GÖRGES angegebenen Schüttelmagneten hergestellt. Zu diesem Zwecke, siehe Fig. 108, ist der Lagerstein nicht in der nach unten herausschraubbaren Lagerschraube, sondern fest auf einer Metallfeder *D* angebracht, welche den Anker für den unteren Schüttelmagneten *U* trägt. Dieser Magnet, in Reihe mit dem Spannungskreis geschaltet, setzt infolge der ihn durchfließenden Wechselströme die Feder *D* in ständige schwache Vibration und damit auch den Lagerstein *F*. Es ist also keinerlei andauernde feste Reibung vorhanden, vielmehr genügt, da das Lager so in steter leichter Schwingung erhalten wird, ein äußerst schwacher Strom im Verbrauchsstromkreise, um den Zähler zum Anlauf zu bringen. Die noch vorhandene Reibung wird durch ein an dem Gehäusevorsprung *C* verschiebbares Eisenstückchen *R* beseitigt, indem letzteres in bekannter Weise durch seine Nähe zum Spannungspol eine Ver-

schiebung des magnetischen Feldes an dieser Stelle und damit ein schwaches zusätzliches Drehmoment hervorruft. Das letztere wird wie üblich von einem Eisenstückchen an der Achse gegen Leerlauf unschädlich gemacht.

110. Raabzähler von Schuckert. Außer dieser einfachen von Hummel angegebenen Parallelschaltung sind nun für den gleichen Zweck, in einem Induktionsmeßapparat die Phase des Spannungsfeldes um eine Viertelperiode zu verschieben, eine Reihe mehr oder minder komplizierter Schaltungen vorgeschlagen und ausgeführt worden, welche in die d r i t t e G r u p p e zu rechnen sind.

Es ist hier zunächst der von Raab erfundenen Methode zu gedenken, durch Kombination zweier getrennter Nebenschlußfelder von möglichst ver-



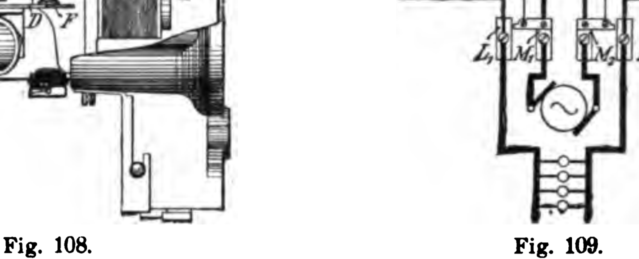


Fig. 108. Fig. 109.

schiedener Impedanz den fraglichen Zweck zu erreichen. Der Grund, weshalb ein ohne solche besondere Justierung auf genau 90° versehener Zähler mit wachsender induktiver Belastung unrichtige Angaben macht, liegt bekanntlich darin, daß das von vornherein stark gegen die Netzspannung verschobene Spannungsfeld eine zu schwache Wirkung auf die von dem Hauptstromsystem in dem Anker induzierten Kurzschlußströme ausübt, sobald dieses Starkstromfeld selbst durch entsprechende induktive Belastung stark verschoben wird. Würde man daher durch sehr starke induktive Belastung die Verschiebung im Netzstromkreise ebenso hoch bringen wie diejenige des Spannungssystemes im Zähler selbst, so würde der Zähler stehen bleiben. Zwischen diesem äußersten Falle und der induktionslosen Belastung ist die Konstante des Zählers je nach der induktiven Belastung starken Schwankungen ausgesetzt, wie dies bereits im vorstehenden (§ 94) auseinandergesetzt wurde und aus der dort angegebenen Formel

$$n = G_2\, \mathfrak{E}\, \frac{\sin(\varphi_1 - \varphi)}{\cos \varphi}$$

hervorgeht.

Dieser unzulässigen Verringerung der Zugkraft läßt sich nun abhelfen, und wird hierdurch das Induktionswattmeter zu einem genau messenden Wattmeter, wenn man ein zusätzliches Drehmoment auf den Anker einwirken läßt, welches bei vollkommen induktionsloser Belastung Null ist, mit steigender induktiver Belastung aber mehr und mehr in Erscheinung tritt. Diese Bedingungen erfüllt eine vom Spannungsstrom erregte, jedoch mit der Netzspannung in Phase befindliche Spule; denn wofern keine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung vorhanden ist, ist das Antriebsmoment dieser Zusatzspule gleich Null, sie bringt aber einen stärkenden Einfluß hervor, sobald zwischen ihr und dem Hauptstrom eine Phasenver-

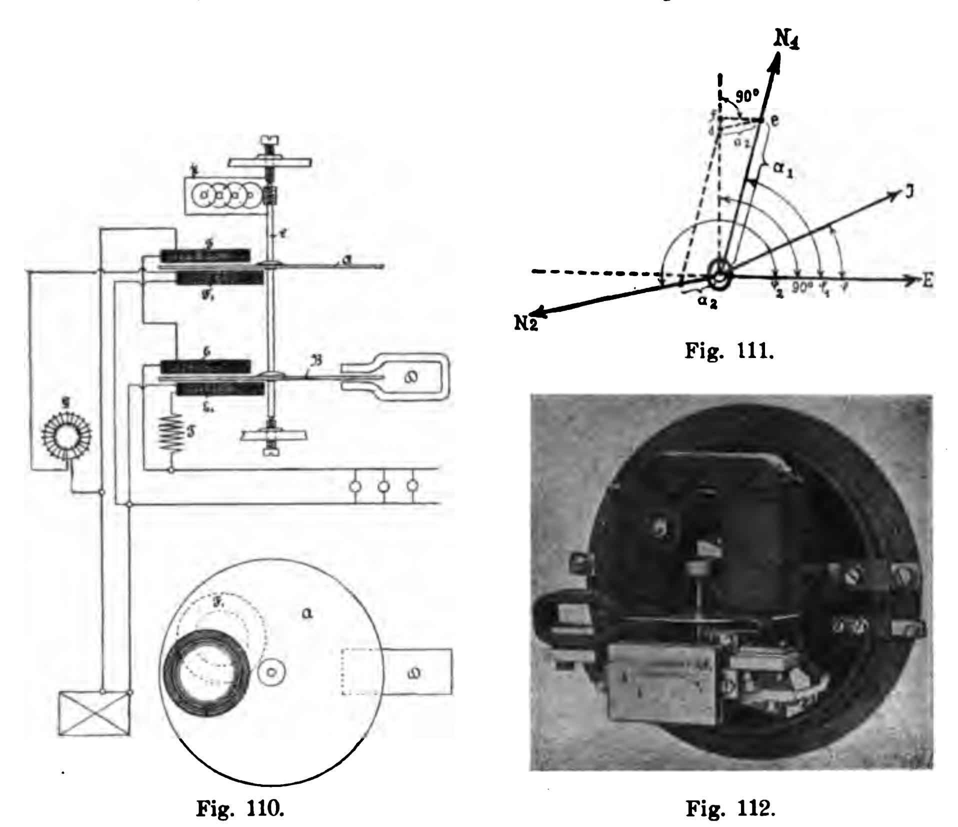


Fig. 111.

Fig. 110.

Fig. 112.

schiebung auftritt. Dieses von Raab angegebene Kompensationsprinzip läßt sich konstruktiv in mannigfacher Weise ausführen, wie dies auch seitens der ausführenden Firma Elektrizitäts-A.-G. vorm. Schuckert & Co. geschehen ist. Anstatt zweier getrennter Strom- und Spannungsspulen, wie aus Fig. 110 hervorgeht, läßt sich die Anordnung beispielsweise weitgehend dahin vereinfachen, daß man nur eine Starkstromspule und zwei übereinander geschobene Spannungsspulen benutzt, deren Feld sich daher zu einem resultierenden zusammensetzt, wie dies aus dem Vektorendiagramm Fig. 111 hervorgeht. Um die Abgleichung genau durchzuführen, d. h. das unterstützende Drehmoment der Zusatzspule in jedem Moment so groß zu gestalten, um die durch die Phasenverschiebung hervorgerufene Verminderung des Drehmomentes der induktiven Spannungsspule auszugleichen, müssen die beiden Spannungssysteme an Windungszahl und magnetischer Anordnung

genau abgeglichen werden, was sich auch zahlenmäßig von vornherein genau nachweisen läßt (siehe MÖLLINGER ETZ. 1898, Heft 36). Fig. 112 zeigt einen solchen SCHUCKERTschen Induktionszähler nach RAABschem Prinzip. Das vorn oberhalb der Ankerspule ersichtliche große Hufeisen stellt die induktive Spannungsspule dar, parallel zu ihm an dem gleichen Träger befindet sich das zusätzliche induktionslose Spannungssystem, beide bilden mit dem unterhalb der Scheibe befindlichen Starkstromkörper das resultierende Drehfeld. Links ist der Bremsmagnet ersichtlich, rechts an dem einen Ende des induktiven Spannungsmagneten das aus einem gebogenen Eisenstückchen bestehende Anlaufeisen, welches zur Reibungskompensation dient.

111. Goerges-Zähler von Siemens & Halske.

Handelt es sich bei den bisher betrachteten Konstruktionen mehr oder minder um die Übereinanderlagerung von Strömen und Feldern zur Erzielung der gewünschten Wirkung, so stellte sich GÖRGES bei seinen von der Firma SIEMENS & HALSKE ausgeführten Induktionsmeßgeräten von vornherein die Aufgabe, nicht nur dem das gewünschte um 90° verschobene Spannungsfeld erzeugenden Strome diese Verschiebung, sondern der denselben erzeugenden Spannung zu erteilen. Dies läßt sich durch irgend welche Drosselspulen nicht ohne weiteres erzielen, wohl aber bietet die von GÖRGES angegebene Brückenschaltung ein vollkommenes Mittel. In einem vor der Jahresversammlung deutscher Elektrotechniker 1897 gehaltenen Vortrage und dem erweiterten Abdruck desselben in der ETZ. 1898, Heft 11 „Über die graphische Darstellung des Wechselpotentials und ihre Anwendung“ legte GÖRGES an Hand dieser graphischen Darstellung die Möglichkeit dar, durch geeignete Kombination von induktivem und induktionslosem Widerstand, besonders in Form einer WHEATSTONEschen Brücke, bei der je ein Paar gegenüberliegender Zweige einmal aus induktivem, dann aus induktionslosem Widerstand gebildet sind, in dem Diagonalleiter jede gewünschte Verschiebung der Spannungsphase zu erzielen. Diese ursprünglich auch für motorische Zwecke bestimmte Brückenschaltung benutzte GÖRGES dann zum Entwurf, außer einer Reihe von Meßinstrumenten, auch eines Wattstundenzählers nach FERRARISschem Prinzip, der von der Firma SIEMENS & HALSKE, A.-G. fabriziert wurde. Hierbei machte sich aus praktischen Rücksichten eine Abänderung der reinen Brückenschaltung nötig, bei der (siehe SCHROTTKE ETZ. 1901, Heft 33) gemäß Fig. 113 und 114 der Brücke eine den größten Teil der Gesamtspannung absorbierende Drosselspule vorgeschaltet wird, und die Spannungsspulen des Zählers die induktiven Brückenzweige bilden. In räumlicher Ähnlichkeit stellen hierbei in Fig. 114 *c—e* und *f—d* in Größe und Richtung die Spannungen der induktiven Brückenzweige, *e—d* und *c—f* diejenigen der induktionslosen Brückenzweige, *e—f* des Diagonalzweiges, *d—b* die Spannung an den Klemmen der Drosselspule

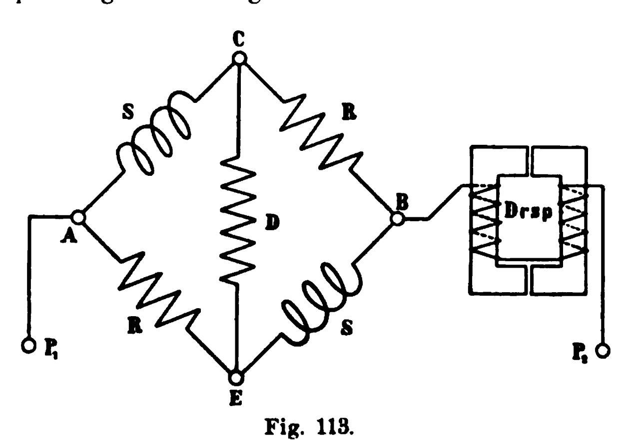


Fig. 113.

und *c—b* schließlich die Netzspannung dar. Der Natur des induktionslosen Widerstandes zufolge sind die Ströme *e—h* und *e—g* in dem induktionslosen Zweig und dem Diagonalleiter mit den sie erregenden Spannungen in Phase, während *e—k*, der aus ihnen resultierende Strom in jedem der induktiven

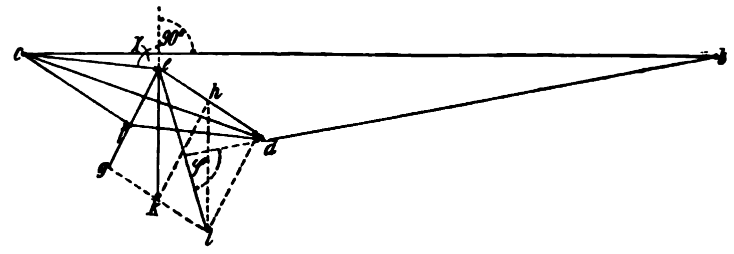


Fig 114.

Brückenzweige um den Winkel χ gegen seine Spannung verzögert ist. Wie aus dem Schema der Fig. 114 zu ersehen ist, läßt sich hierbei durch ent-

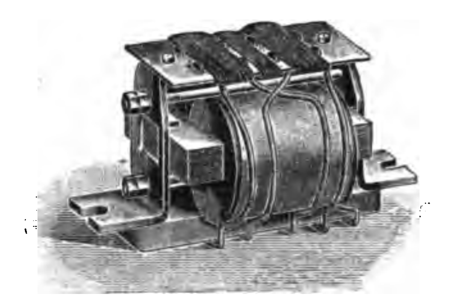


Fig. 115.

sprechende Regulierung an dem induktionslosen Diagonalzweig und der Drosselspule leicht *e—k*, die Stromstärke in den die induktiven Brückenzweige bildenden Spannungsspulen des Apparates in senkrechte Lage zu der äußeren Netzspannung *c—b* bringen. Die Vorschaltung der Drosselspule ermöglicht es, die letztere samt induktionslosen Brückenzweigen und Diagonalleiter in sehr handlicher Form mechanisch zusammenzubauen, wie dies Fig. 115 zeigt. Diese bis zu 500 Volt verwendete Kombination wird für höhere Spannungen mit getrennter Drosselspule ausgeführt.

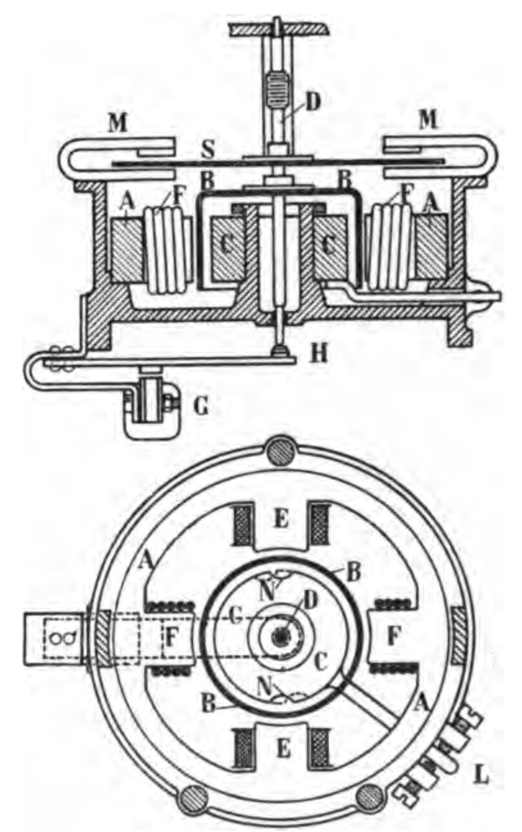


Fig. 116 a/b.

Was die konstruktive Ausführung des Zählers anlangt, welche in Fig. 116 a und b und 117 wiedergegeben ist, so besteht das Magnettriebsystem nach Art einer vierpoligen Innenpolmaschine aus einem aus gestanzten Eisenblechen zusammengesetzten Ring *A* mit vier vorspringenden Polen *EE*, *FF*, von denen je zwei gegenüberliegende *FF* durch den Stark-

strom, und EE durch die Spannung erregt werden. Den magnetischen Schluß finden die vier Pole in dem konzentrisch zu der Drehachse ebenfalls aus unterteiltem Eisen aufgebauten Eisenkern C, um welchen die trommelförmige Kurzschlußarmatur B rotiert. Ihre Bewegung wird durch die besondere Bremsscheibe S gehemmt, die in dem Felde der permanenten Magnete MM umläuft. Die oben in einem Halslager geführte Achse rotiert mit dem unteren Ende in einem Saphirstein, der entweder in der bereits bei dem Siemens-Schuckert-Zähler beschriebenen Ausführung federnd gelagert ist, oder auf Wunsch durch den besonderen durch die Spannungsspule erregten Schüttelmagneten G in ständiger Vibration erhalten wird. Zum Ausgleich der Reibung besitzt der innere Eisenkern C an den Enden eines Durchmessers gegenüber den Spannungspolen je eine Nute. Bei genau symmetrischer Stellung dieser Nuten zu den Spannungspolen üben dieselben auf die Armatur keine Wirkung aus. Wird aber der Eisenkern und damit auch die Nuten mittelst der von außen zugänglichen Reguliervorrichtung L um ein geringes in der einen oder anderen Richtung verschoben, so wird durch die hierdurch bewirkte Verzerrung des Spannungsfeldes ein zusätzliches Drehmoment auf die Armatur ausgeübt, welches die Reibung praktisch ausgleicht. Um dagegen den Leerlauf unter allen Umständen und zwar besonders auch bei sehr bedeutenden Überspannungen bestimmt zu verhüten, werden nach dem Vorschlage von Schrader an dem unteren Rande der Trommel vier kleine Einschnitte angebracht, durch welche nach erfolgter Ausschaltung des Verbrauchsstromes die Armatur fast momentan festgehalten wird, sobald zwei dieser Ausschnitte an dem Spannungspol vorbei rotieren wollen. Sobald sie in symmetrische Lage zu den Spannungspolen kommen, halten letztere die Armatur in dieser Stellung des geringsten magnetischen Widerstandes fest. Diese Vorrichtung wirkt ungleich den sonstigen Eisenhäkchen derart, daß mit wachsender Spannung auch das die Armatur in dieser Stellung festhaltende Moment zunimmt, während naturgemäß die das sonst verwendete Eisenhäkchen festhaltende Kraft seitens des Bremsmagneten unabhängig von der Spannung immer die gleiche bleibt. Fig. 117 zeigt den gesamten Aufbau des Zählers, aus dem die Lagerung des wirksamen Triebsystemes, der Dämpfungsmagnete, der Drosselspule und des Zählwerks zu ersehen ist. Dieser Zähler hat nach Vereinigung der betr. Abteilung von Siemens und Schuckert zu den Siemens-Schuckert-Werken der bereits beschriebenen neueren Induktionszählertype der Siemens-Schuckert-Werke weichen müssen.

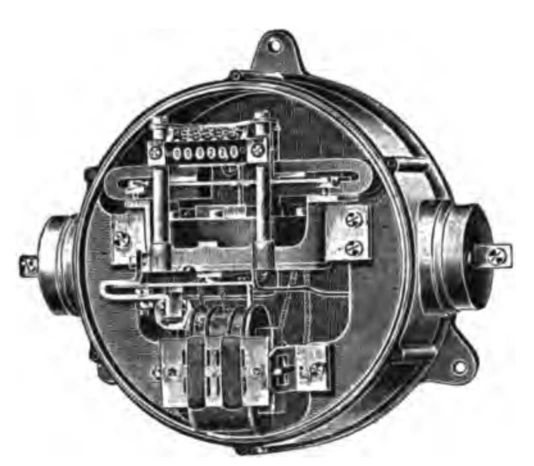


Fig. 117.

112. Hartmann & Braun A.-G.

Mit unter den erstem Firmen ließen sich die Ausbildung der Induktionszähler in Theorie und Praxis sehr angelegen sein Hartmann & Braun A.-G., Frankfurt a. M. Nachdem durch ihren Chefelektriker

Bruger die erste Theorie des Induktionszählers aufgestellt wurde, welche noch heute in großen Zügen zutreffend ist, arbeitete die Firma verschiedene Methoden aus, um die genaue Verschiebung der Spannungsphase im Zähler auf 90° gegenüber der Netzspannung zu bringen (siehe Görmer ETZ. 1899, Heft 43). Kennzeichnend und gemeinsam sämtlichen Methoden ist der Gedanke, in einem bestimmten Teil des Stromkreises, nämlich in den Nebenschlußmagneten des Zählers außer der äußeren Netzspannung noch eine Zusatzspannung einzuführen, die aus der Sekundärspule eines kleinen mit der Primärspule in den Spannungskreis in Reihe geschalteten Transformators gewonnen wird. Es ist hier leicht möglich, die Phase des resultierenden Stromes in diesem Teile des Stromkreises um mehr wie 90° zu verschieben. In der ursprünglichen einfachen Schaltung war der Sekundärkreis des Hilfstransformators direkt in elektrischer Verbindung mit dem auf 90° Phasenverschiebung zu bringenden Nebenschlußmagneten, später und noch heute wird magnetische Kuppelung benutzt, indem auch der Nebenschlußmagnet eine Primär- uud Sekundärwickelung erhält. Es sind alsdann die Primärwickelungen des besonderen Transformators und des Spannungsmagneten ebenso hintereinander geschaltet wie es die Sekundärwickelungen beider Systeme sind. Zur Regulierung ist noch in den Sekundärkreis ein induktionsloser Widerstand eingefügt.

Die konstruktive Ausführung dieses Prinzipes ist aus den Fig. 118 bis 119 zu ersehen, welche den Spannungsmagneten oberhalb der Ankerachse,




Fig. 118.



Fig. 119.

den durch die Starkstromspule erregten unteren Pol und den Hilfstransformator erkennen lassen. Die aus einer hohlen Messingröhre bestehende und die Aluminiumscheibe tragende Ankerachse trägt unten einen kugelförmig abgerundeten Stahlzapfen, der auf einem in der unteren Lagerschraube federnd angeordneten Saphirstein seinen Stützpunkt findet. Auch bei dieser Konstruktion wird mit einer Verminderung der Reibung durch den Einfluß der das gesamte bewegliche System in feine Vibrationen versetzenden Wechselfelder gerechnet. Die obere Lagerkonstruktion ist ähnlich wie bei mehreren vorbeschriebenen Ausführungsformen in Form der sich um einen festen oberen federnden Stahlzapfen drehenden Ankerachse gehalten. Es tritt hier ähnlich wie bei der Konstruktion der Westinghouse Gesellschaft

eine Mischung und teilweiser Ineinanderverlauf der Kraftlinien des Spannungs- und Strommagneten ein. Um sowohl von der Fabrikation her dem Zähler anhaftende Unsymmetrien bei der Eichung zu nehmen, wie auch demselben das zum Ausgleich der Reibung nötige zusätzliche Drehmoment zu geben, dient ein von der Vorderseite aus verstellbares und einen Teil der Oberfläche der Spannungspole abdeckendes Aluminiumblech das in einem Schlitz verschiebbar angeordnet ist. Ein wie üblich auf die Ankerscheibe geklebtes Eisenplättchen verhindert den Leerlauf. Der Zähler läuft bei 1 % der Vollast sicher an.

113. Danubia A.-A.

Das gestellte Problem, in dem Induktionszähler die zu seinem genauen Arbeiten als Wattmeter erforderliche Phasenverschiebung von 90° zwischen dem wirksamen Strom- und Spannungsfelde zu erzielen, wurde anfänglich nur nach der Richtung hin bearbeitet, die von vornherein in dem Spannungssystem vorhandene große Phasenverschiebung auf genau 90° zu erweitern. Je mehr sich nun die genaue Erkenntnis der hierbei zu erfüllenden wesentlichen Bedingungen vertiefte, und die hinsichtlich der Verschiebung des Spannungsfeldes vorteilhaftesten Lösungen durch entsprechende Patente zum Monopol der einzelnen Firmen wurden, ging man dazu über, zur Beseitigung dieser Schwierigkeit auch das Hauptstromfeld heranzuziehen, was sich auch als durchaus tunlich und vorteilhaft erwies. Als Beispiel dieser die vierte Gruppe bildenden Konstruktionen diene zunächst der Einphasenzähler der DANUBIA A.-G. Straßburg, dessen Stromverlauf und schematische Anordnung aus Fig. 120 und 121, dessen mechanische Gesamtausführung aus den Fig. 122 und 123 ersichtlich ist. Das oberhalb der drehbaren Ankerscheibe im wesentlichen hufeisenförmig ausgebildete Magnetsystem trägt in seinem oberen Teile zwei von der Spannung erregte Wickelungen, während die nach unten bis auf einen kleinen Luftspalt sehr eng aneinander geführten Enden der Schenkel von einer gemeinsamen vom Starkstrom erregten Wickelung durchflossen werden. Unterhalb der Scheibe ist der von einem

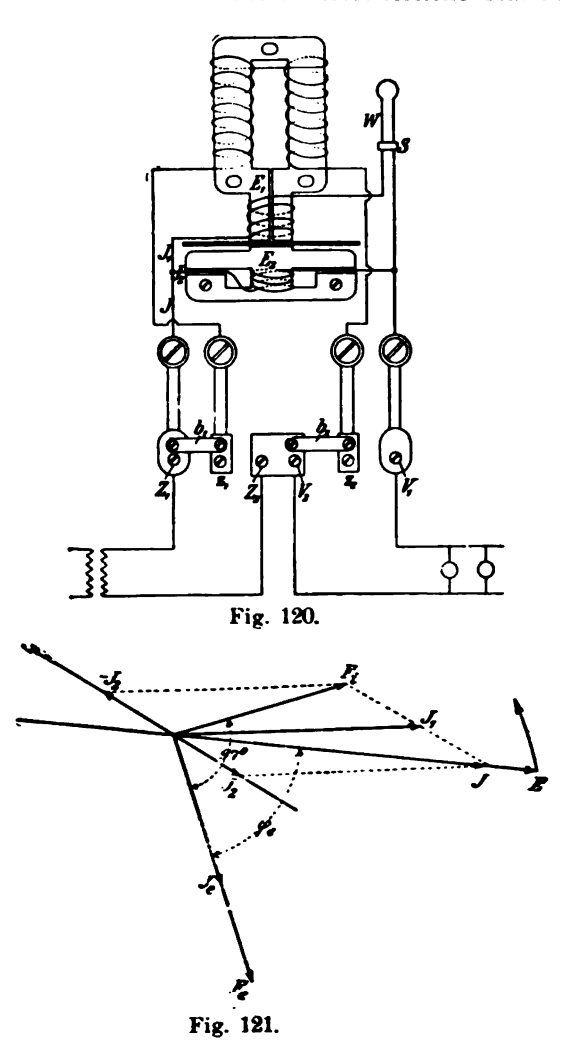


Fig. 120.

Fig. 121.

Teil des Verbrauchsstromes erregte Hauptstrommagnet angebracht, welcher zu beiden Seiten durch Vorsprünge des kurzen Magnetkernes ebenfalls bis auf einen kleinen Luftspalt an beiden Seiten gut geschlossen ist. Die hiermit verbundene Absicht ist die, daß der diese unterhalb der Ankerscheibe befindliche Magnetwickelung durchfließende Teilstrom infolge des guten in diesem Eisenkern vorhandenen magnetischen Schlusses stark abgedrosselt wird, so daß der überwiegende Teil durch die die Enden der beiden oberen Magnetschenkel erregende andere Starkstromwickelung fließt. Wie aus dem Vektorendiagramm der Fig. 121 hervorgeht, wird hierdurch der Gesamtstrom J in

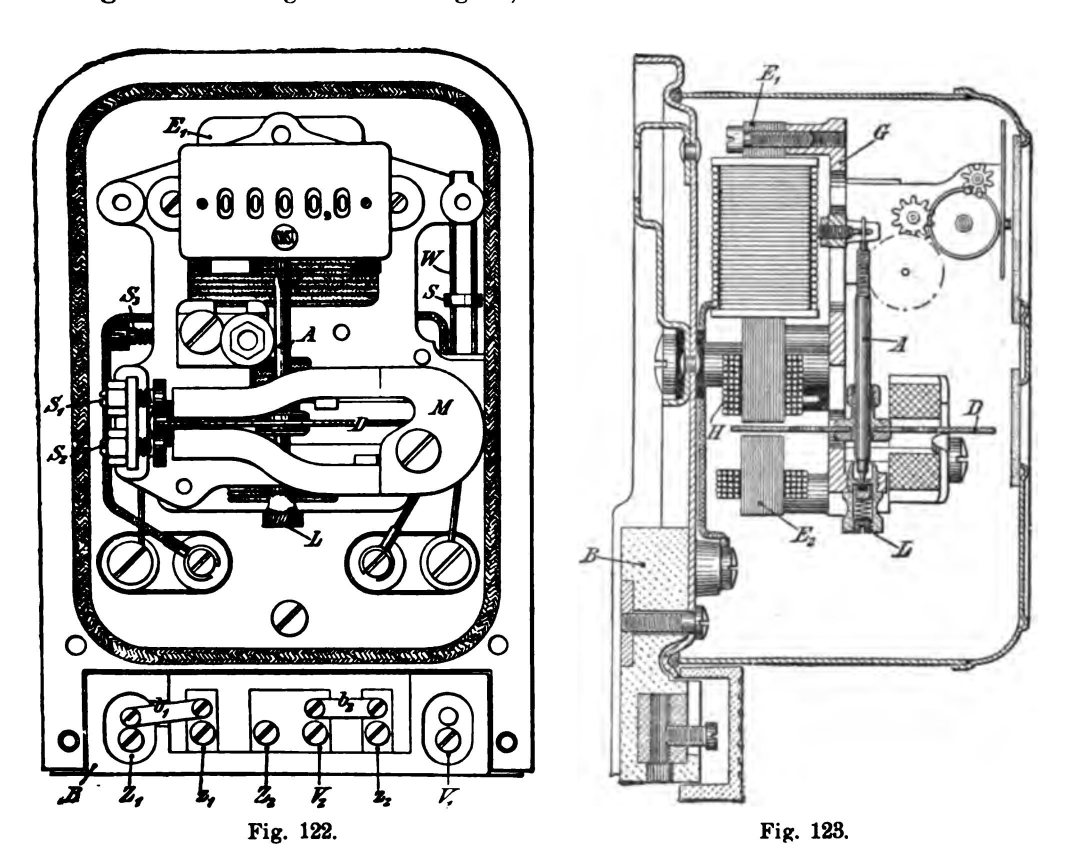


Fig. 122. Fig. 123.

die beiden gegen ihn phasenverschobenen Komponenten J_1 und J_2 zerlegt. Durch Umkehrung des Wickelungssinnes in J_2 gemäß dem Vektor $-J_2$ wird hierdurch das resultierende Starkstromfeld an Größe und Richtung gleich Vektor F_i gemacht, eilt also bei dem durch den eingezeichneten Pfeil angegebenen Drehsinn dem Gesamtstrome J in der Phase voraus. Die gegen den Strom J stark verzögerte Phase des Spannungsfeldes, durch den Vektor F_e dargestellt, wird hierdurch dem Vektor des resultierenden Starkstromfeldes gegenüber auf die gewünschte Phasendifferenz von 90^0 gebracht. Die Abgleichung des Zählers erfolgt hierbei durch den Schieber S an dem induktionsfreien Widerstande W, ähnlich wie bei dem O'K-Zähler derselben Firma. Die übrige mechanische Konstruktion erhellt vollständig aus den Fig. 122 und 123. Es ist ebenfalls für die Reibungskompensation wie zur Verhinderung des Leerlaufes in üblicher Weise eine Vorrichtung vorgesehen.

114. Isaria-Zählerwerke. In gleicher Weise wie bei der vorhergehenden Konstruktion erfolgt die Abgleichung der Phasenverschiebung auf 90° durch eine Teilung des Verbrauchsstromes in dem von den Isaria-Zählerwerken, G. m. b. H., München, konstruierten Induktionszähler, dessen mechanischer Aufbau aus der Querschnittszeichnung von Fig. 124 zu ersehen ist. Das magnetische Triebsystem ist im wesentlichen dasselbe wie bereits in Fig. 87 wiedergegeben, nur sind bei dem auf 90° abgeglichenen Zähler auch die äußeren Kerne der unterhalb der Ankerscheibe befindlichen vier Strompole mit einer Stromwickelung und außerdem mit je einem Hilfsjoch des besseren magnetischen Schlusses wegen ausgestattet. Dem oberen durch eine dünndrähtige Spannungsspule erregten Felde N, Fig. 124, das bis auf zwei dünne Luftspalte vollständig geschlossen ist, wird hierdurch von vornherein eine große Phasenverschiebung erteilt. Der Verbrauchsstrom teilt sich dagegen in die mittleren der unteren vier Strompole einerseits, und die magnetisch besser geschlossenen äußeren andererseits. Die Abgleichung erfolgt durch einen induktionsfreien in den Kreis der mittleren eingeschalteten Widerstand W mit Schieber. Hierdurch sowie infolge des magnetisch unvollkommeneren Schlusses, d. h. der geringeren Selbstinduktion, wird nicht nur der größere Teil des Gesamtstromes durch die mittleren Stromwindungen abgelenkt, sondern es

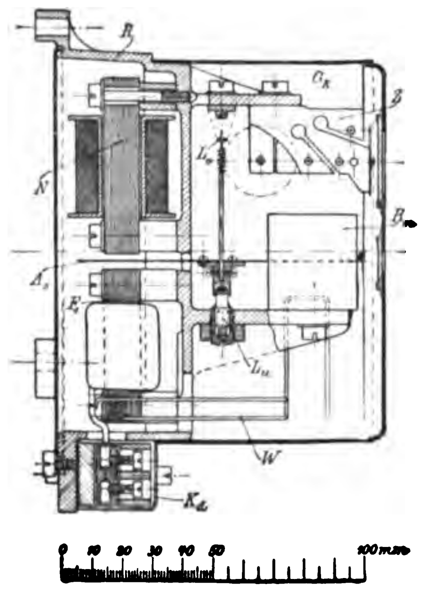


Fig. 124.

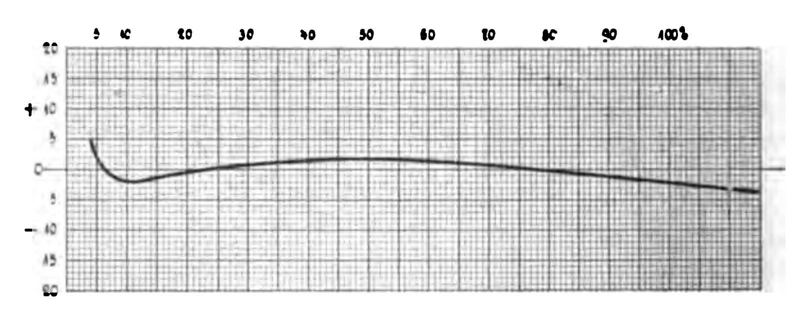


Fig. 125.

wird auch die Stromphase in den äußeren Polwickelungen beträchtlich gegen die der mittleren verzögert. Ebenso wie bei dem vorbesprochenen Zähler erreicht man durch Umkehr des Wickelungssinnes in den äußeren Wickelungen, daß das resultierende Starkstromfeld sogar noch eine Voreilung gegen das der mittleren erhält, die an dem Regulierwiderstand W auf genau 90° Phasenvoreilung gegen die stark verzögerte Phase des Spannungsfeldes gebracht wird. Die Reibungskompensation geschieht durch ein zwischen Ankerscheibe und unter dem linken Starkstrompol angebrachtes dünnes Aluminiumblech. Die in demselben gleichfalls vom Spannungsmagneten erregten

Ströme bringen in Rückwirkung auf die Scheibenströme das gewünschte Zusatzdrehmoment in der erforderlichen Richtung hervor. Fig. 125 gibt die Fehlerkurve des Zählers in Prozenten, abhängig von der Belastung an.

In der neuesten Ausführungsform haben die Isaria-Werke das vorstehend beschriebene Prinzip zur Erzielung von genau 90° Phasendifferenz zwischen dem wirksamen Hauptstrom- und Nebenschlußfelde verlassen und sind zu nachstehender eigenartiger Konstruktion übergegangen. Der in den Fig. 126 und 127 in Querschnitt und Rückansicht dargestellte Zähler wird wie bei der vorigen Konstruktion und der bereits beschriebenen von Hartmann & Braun, A.-G., durch die gußeiserne Rückplatte in zwei ungleiche Teile

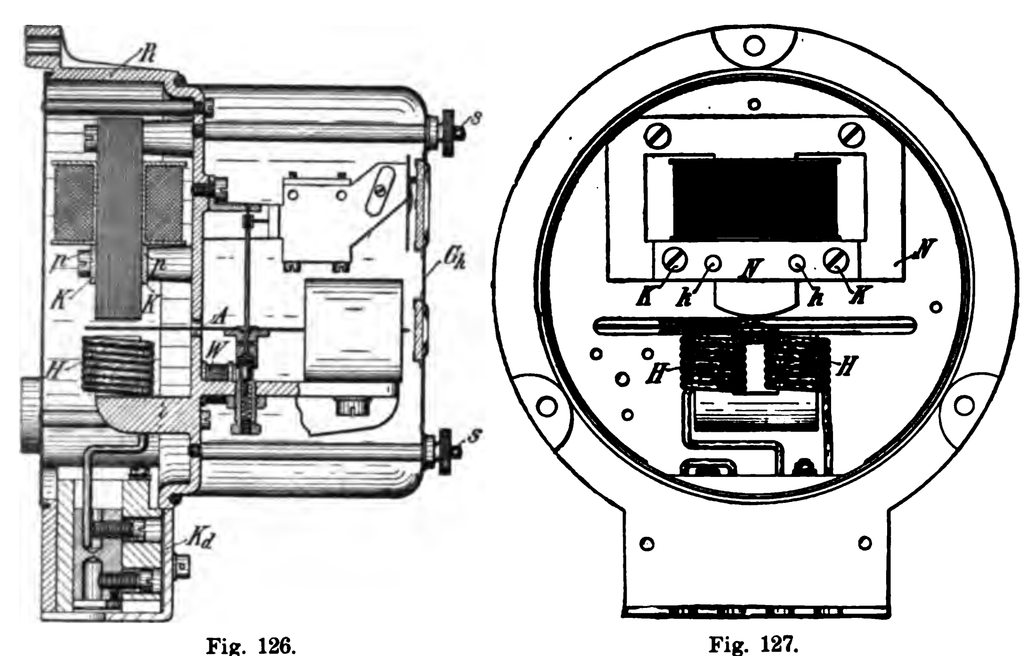


Fig. 126. Fig. 127.

zerlegt, und befindet sich das wirksame Triebsystem wieder in dem so geschaffenen Hohlraum an der Rückseite des Zählers. Das Hauptstromfeld wird nun bei dieser neuesten Konstruktion in zwei gußeisernen Vorsprüngen der Rückwand von aus Fig. 126 ersichtlicher Gestalt, also in massiven Polstücken durch eine vom Verbrauchstrom durchflossene Erregerwickelung erzeugt. Oberhalb der Scheibe befindet sich das Nebenschlußsystem, welches nunmehr gemäß Fig. 127 fast vollkommen magnetisch geschlossen ist, um hierdurch eine sehr starke natürliche Verzögerung der Spannungsphase zu erzielen. Der mittlere Schenkel wird jedoch über den Rahmen des ganzen Magnetsystemes hinaus zu einem kurzen Vorsprung ausgebildet, welcher auf diese Weise zu einer für die Messung benutzten erheblichen Streuung des Nebenschluß-Magnetsystemes Veranlassung gibt. Dieser untere Teil des Nebenschlußmagneten wird durch einen Kurzschlußring *K* umgeben, der aus zwei Messingplatten *pp* und sie zusammenhaltenden Kupfernieten *kk* gebildet, gleichzeitig diesen unteren Teil des Nebenschlußmagneten mechanisch zusammenhält und durch die in ihm erzeugten Kurzschlußströme die Phase des Spannungsfeldes über 90° gegen die des Hauptstromfeldes verzögert. Die ge-

naue Regulierung auf 90° erfolgt durch einen mit der Nebenschlußwickelung in Reihe geschalteten induktionsfreien Widerstand W. Da die in den massiven Hauptstromspulen auftretenden Wirbelströme das Hauptstromfeld ebenfalls verzögern, muß auch das Spannungsfeld etwas über 90° verzögert werden. Als Reibungskompensation dient wieder ein unterhalb der Ankerscheibe drehbar gelagerter Flügel aus Aluminiumblech. Das Drehmoment wächst mit Drehung des Flügels vom Rande nach der Mitte zu. Der übrige mechanische Aufbau ist der bisherigen Konstruktion gegenüber nicht wesentlich geändert.

2. Einphasen-Mehrleiter-Zähler.

115. Allgemeines. Ebenso wie bei Gleichstrom-, läßt sich auch bei Wechselstrombetrieb durch Anwendung des Mehrleitersystemes, in der praktischen Ausführung meistens der Dreileiterschaltung eine Ersparnis an Kupfer und bessere Ausnutzung vorhandener Leitungen durch Anwendung der höheren Spannung erzielen. Da dem gleichen Zweck die im Folgenden näher beschriebenen Mehrphasensysteme dienen, so ist zwischen beiden Arten der Stromverteilung wohl zu unterscheiden. Das Mehrleiter-Einphasensystem besteht in gleicher Weise wie bei Gleichstrom in der Hintereinanderschaltung zweier Einphasenmaschinen. Die Außenleiter sind an die die doppelte

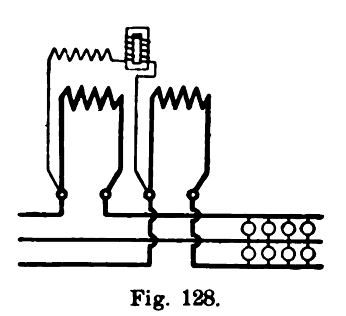


Fig. 128.

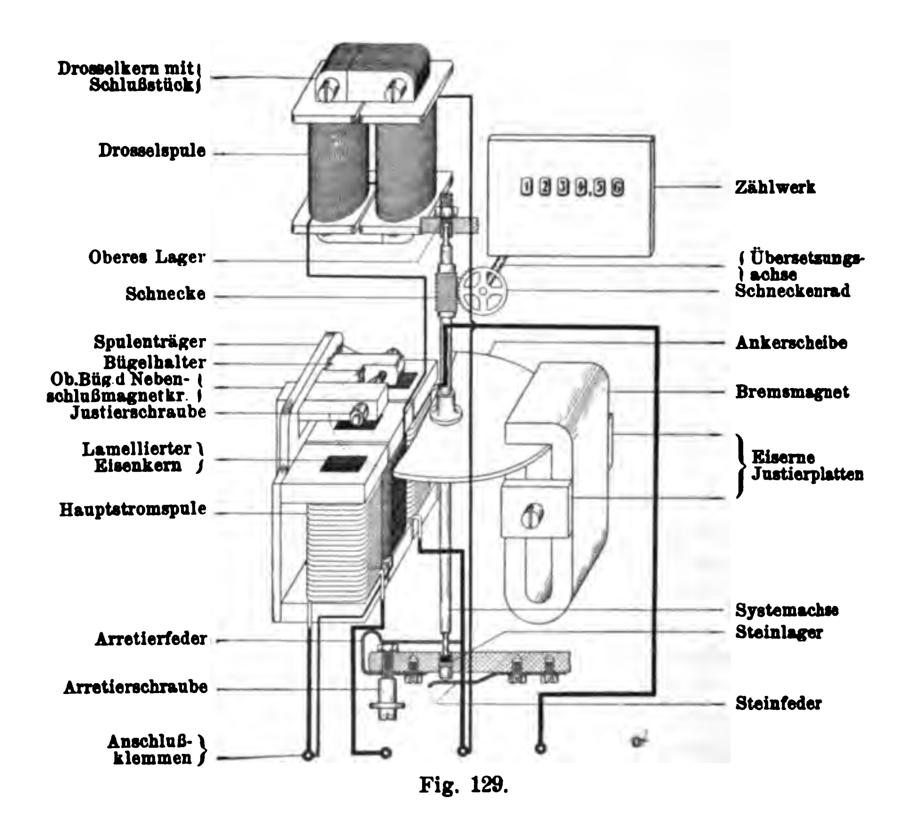


Fig. 129.



Spannung gegeneinander besitzenden Endklemmen, der Mittelleiter an die Verbindungsleitung beider Maschinen herangeführt. Wird von einem solchen System nur eine Leitung zu irgend einem Konsumenten abgezweigt, so geschieht die Messung natürlich mit einem einfachen Einphasenzähler für die halbe Außenleiterspannung. Werden, wie meistens bei größeren Anschlüssen, beide Außenleiter samt Nulleiter eingeführt, so läßt sich die Messung einmal und zwar am genauesten mit zwei Einphasenzählern durchführen, welche gleichzeitig noch den Unterschied der in den beiden Netzhälften verbrauchten Energie angeben. Kommt, wie meistens nur von praktischem Wert, nur der Gesamtbetrag der Energie in Frage, so werden hierfür besondere Einphasen-Dreileiterzähler benutzt, wie dieselben fast von allen Firmen, die sich mit der Herstellung von Einphasenzählern befassen, geliefert werden. Es genügt in den meisten Fällen, wenn statt der bei einem Einphasenzähler ungeteilten Starkstromwickelung, oft auf demselben Kern, zwei voneinander getrennte Starkstromspulen benutzt werden, deren jede mit einem Außenleiter verbunden ist. Vorzuziehen ist hierbei die Anordnung getrennter Eisenkerne, um die die volle Netzspannung gegeneinander besitzenden Starkstromspulen genügend kräftig voneinander isolieren zu können. Hier wie bei Gleichstrom gelten bei der Spannungsmessung dieselben Regeln und Bedenken bezüglich der Verwendung der ungeteilten Außenleiterspannung, was allerdings aus praktischen Gründen meistens getan wird.

116. Landis & Gyr. Fig. 128 und 129 stellen Schaltung und schematische Darstellung eines solchen Einphasen-Dreileiterzählers der Firma Landis & Gyr, Zug, dar, welcher in drei Typen mit Abstufungen der Stromstärke bis 30, 150 und 400 Amp. ausgeführt wird. Für höhere Spannungen und Stromstärken kommen besondere Vorschaltwiderstände oder Meßtransformatoren zur Anwendung.

3. Mehrphasenzähler für gleiche Belastung der Phasen.

117. Verschiedene Schaltungen. Die vorbeschriebenen Einphasenzähler können mit entsprechender Abänderung der Schaltung ebenfalls zur Messung der Energie von gleichbelasteten Mehrphasensystemen benutzt werden, wie dies auch seitens der meisten Firmen geschieht. Von den verschiedenen Mehrphasensystemen kommt heute praktisch lediglich das Dreiphasen- oder Drehstromsystem in Frage. Die Energie eines solchen Drehstromsystemes stellt sich bekanntlich bei gleicher Belastung in dem Ausdruck $A = \sqrt{3}\, E\, J \cos\varphi$ dar, wobei E und J die effektiven Werte von Strom und Phasenspannung, $\sqrt{3} = 1{\cdot}732$ der dem Dreiphasensystem eigentümliche Koeffizient und $\cos\varphi$ die zwischen einem Strom und der zugehörigen Sternspannung herrschende Phasenverschiebung darstellt. Wie bereits in Nr. 26 gelegentlich der Besprechung der verschiedenen Zählerschaltungen ausgeführt, kann man die Messung sowohl mit dieser Sternspannung, d. h. der Spannung des betr. Leiters gegen Erde oder vorhandenen Nullpunkt, oder mit einer der Phasen- oder Außenleiterspannungen ausführen, und sind die betr. Schaltungen bereits in den Fig. 9 und 10 wiedergegeben. Hierfür ist es gleichgültig, ob das messende System ein Cosinus- oder Sinusmeßapparat ist, d. h. ein dynamometrisches oder Induktionsinstrument, vorausgesetzt, daß letzteres auf genau 90° Phasenverschiebung zwischen beiden wirksamen Feldern abgeglichen ist.

Dies ist aber nur bei der Benutzung der Sternspannung nötig. Da der

Nullpunkt in den meisten Fällen nicht ohne weiteres zugänglich ist, und um seine künstliche Schaffung durch nur zu diesem Zweck notwendige Widerstände zu vermeiden, benutzt man in vielen Fällen statt dessen eine der anderen ohne weiteres zugänglichen vollen Phasenspannungen, wie dies z. B. die Firma Hartmann & Braun A.-G., Frankfurt a. M. tut, um ihre im Vorstehenden bereits beschriebenen Einphasenzähler zur Messung eines solchen gleichbelasteten Dreiphasensystemes fähig zu machen. Es geschieht dies auf Grund folgender Überlegungen.

118. 60° Schaltung von Hartmann & Braun A.-G.

Stellen in dem Diagramm Fig. 130 E_1 E_2 E_3 die Dreieckspannungen dar, während e_1 e_2 e_3 die dazu gehörigen Sternspannungen sind, und sind bei der angenommenen gleichen Belastung alle Dreiecks- und Sternspannungen

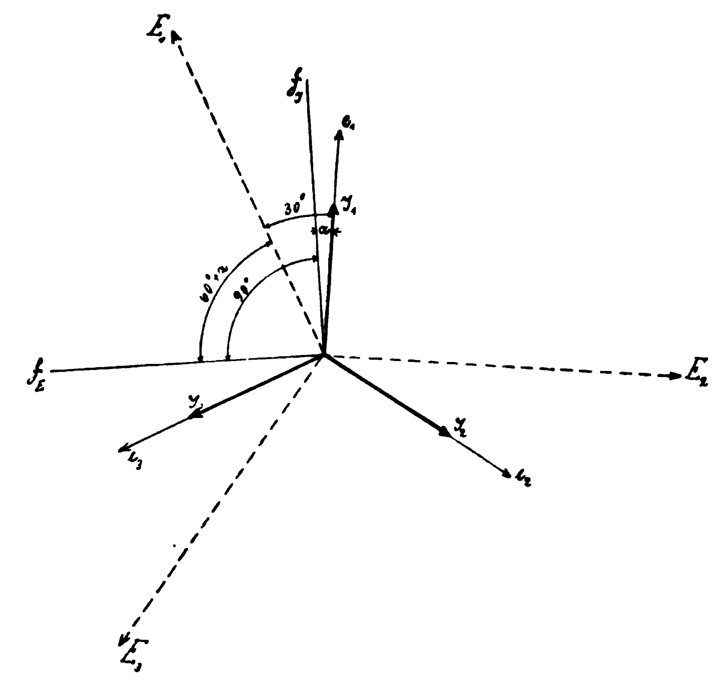


Fig. 130.

untereinander gleich, so ist unter dieser Voraussetzung in der vorhin angegebenen Deutung der betr. Größen die Leistung des gleichbelasteten Dreiphasensystemes

$$A = \sqrt{3}\ E\, J \cos \varphi.$$

Statt nun diese Leistung durch einen gewöhnlichen Einphasenzähler zu messen, bei dem das Nebenschlußfeld um genau 90^0 gegenüber der Sternspannung e, oder praktisch sogar um $90^0 + \alpha$ verschoben werden müßte, da meistens das Hauptstromfeld noch durch Wirbelströme und andere Einflüsse um einen gewissen Winkel α gegen den Hauptstrom verschoben ist, wird zur Messung eine der Dreiecksspannungen E benutzt, doch darf das Nebenschlußfeld im Zähler jetzt nicht eine Phasenverschiebung $90 + \alpha$ gegen die das Feld erzeugende Spannung besitzen, sondern nur eine solche von $60 + \alpha$, da ja die Spannung E_1 schon um 30^0 durch die Natur des Drehstromes gegen die Spannung e_1 verschoben ist. Ein so geschaffener und

demgemäß geschalteter Zähler zählt die wirkliche Drehstromarbeit, sobald seine Konstanten richtig bemessen sind. Die Phasenverschiebung des Hauptstromfeldes wird man zweckmäßig durch künstliche Mittel noch vergrößern, um mit wachsendem α ebenfalls im Spannungssystem eine größere Phasenverschiebung anwenden und damit auch die im Nebenschluß verzehrte Energie vermindern zu können.

Bei der Einschaltung ist jedoch genau darauf zu achten, daß der Nebenschluß eines solchen Zählers tatsächlich an die Spannung E_1 und nicht etwa an die Spannung E_3 gelegt wird, wenn die Hauptstromspule den Strom J_1 führt. Da nämlich zwischen dem Außenleiter J_1 und dem anderen J_2 die Spannnung E_1, und zwischen dem Leiter J_1 und J_3 die Spannung $-E_3$ besteht, so ist eine Verwechselung leicht möglich, und muß deshalb auf richtigen Abschluß geprüft werden. Würde der Zähler aus Versehen mit der falschen Phase verbunden, d. h. der Nebenschluß an die Spannung $-E_3$ gelegt, so würde er nicht, wie richtig wäre, eine Geschwindigkeit

$$v = C E J \sin (90 - \varphi)$$

haben, sondern seine Geschwindigkeit wäre

$$v_1 = C E J \sin (30 - \varphi).$$

Im Falle des falschen Anschlusses würde der Zähler also immer zu wenig zeigen, bei über 30^0 hinaus wachsendem Winkel φ würde die Scheibe sogar nach Stillstand in entgegengesetztem Sinne rotieren. Es gibt glücklicherweise ein leichtes Mittel, um sich bei der Montage des Zählers von der Richtigkeit des Anschlusses zu überzeugen, indem man nämlich den Apparat hintereinander mit der einen und anderen Phase verbindet und hierdurch als den richtigen Anschluß leicht denjenigen herausfindet, bei welchem die Scheibe schneller umläuft.

119. Schaltung der Isariazählerwerke.

Nach wesentlich gleichem Prinzip arbeitet der Isaria-Zähler für Drehstrom mit gleichbelasteten Zweigen, wie derselbe auch zur amtlichen Prüfung durch die Physikalisch-Technische Reichsanstalt zugelassen ist. Der im übrigen dem gewöhnlichen Einphasenzähler derselben Firma, wie in Nr. 114 beschrieben, sehr ähnliche Zähler zeigt gemäß Fig. 131 und 132 eine etwas davon abweichende Schaltung. Das Spannungsmagnetsystem ist das gleiche wie bei dem Einphasenzähler, die Starkstrommagnete sind dagegen anders ausgeführt und geschaltet. Die mittleren Pole F_1 F_1 tragen allein eine Starkstromwickelung, während die seitlichen Schenkel F_2' F_2 unbewickelt sind und ohne die bei dem Einphasenzähler vorhandenen Jochstücke ausgeführt werden. Dagegen wird zu den Windungen der mittleren Schenkel F_1 F_1 ein regulierbarer induktionsloser Widerstand parallel gelegt, durch den die Phase des resultierenden Starkstromfeldes (in ähnlicher Wirkung wie durch die entsprechende Schaltung des Einphasenzählers) gegen den Starkstrom selbst verzögert wird, um so in gleicher Weise wie bei der vorgehenden Konstruktion von Hartmann & Braun A.-G. die von vornherein um 30^0 gegen die zugehörige Sternspannung verschobene Phasenspannung benutzen zu können und den Nebenschlußverbrauch nach Kräften gering zu halten. Es wird hierbei gemäß Fig. 132 der Hauptstromkreis in den Linienstrom J_1 eingeschaltet und dessen Phase bezüglich des wirksamen Starkstromfeldes in die des Vektors H_i, d. h. um ca. 10^0 verschoben. Die zur Messung benutzte Stromspannung E_b ist in der Phase gegenüber der den

Linienstrom J_1 erzeugenden Dreieckspannung E_1 um 150° voraus und erzeugt das Nebenschlußfeld H_e in der gleichen Weise, wie bei dem gewöhnlichen Einphasenzähler. H_e ist daher gegen die erzeugende Spannung E_b um den Winkel α

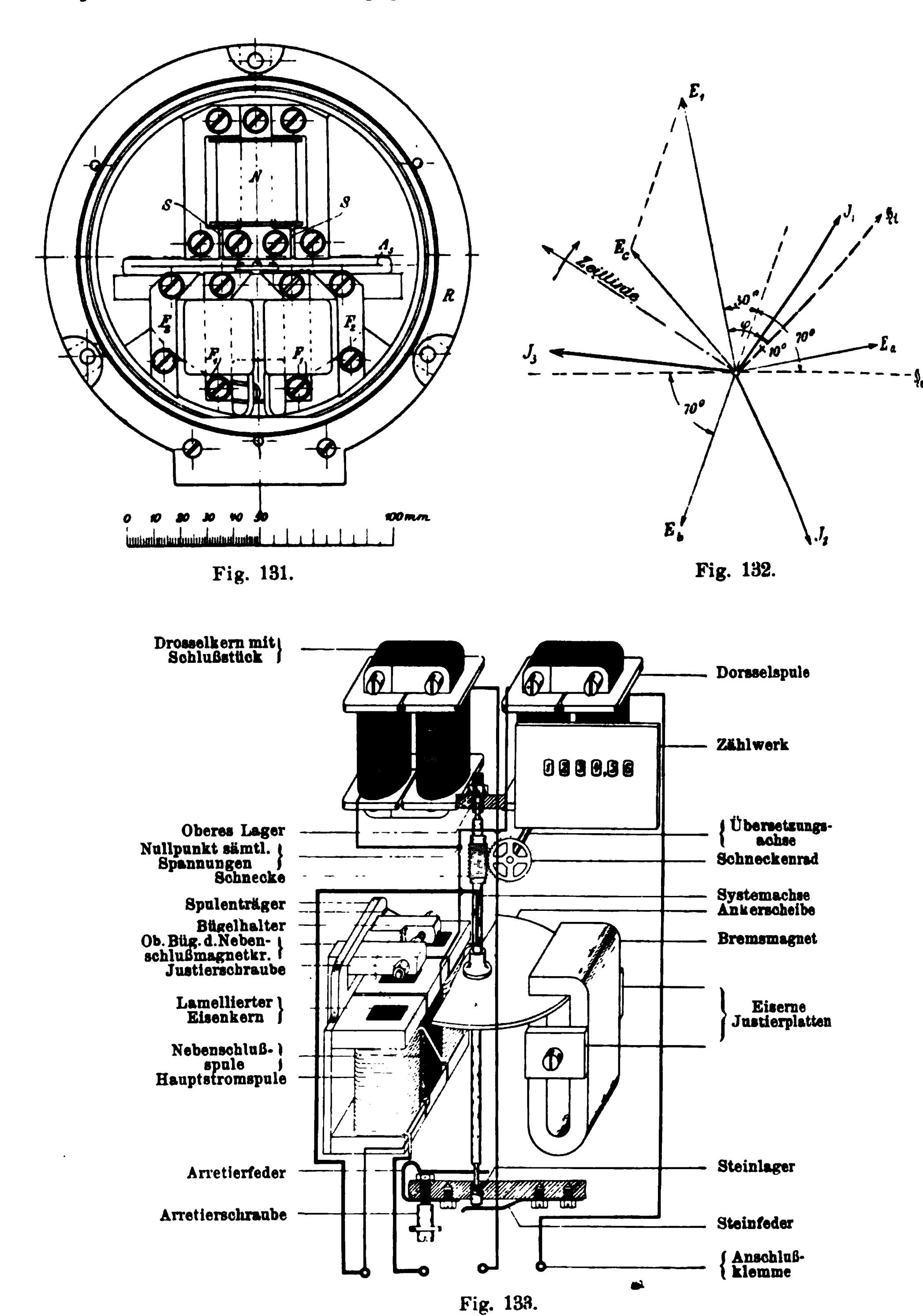


Fig. 131.

Fig. 132.

Fig. 133.

von ungefähr 70° nach rückwärts verschoben und bildet folglich mit dem Vektor E_1 den Winkel $\alpha + 30°$. Da nun das auf den Anker ausgeübte Drehmoment in jedem Induktionszähler gleich dem Produkt der beiden wirksamen Felder und dem Sinus ihres Verschiebungswinkels ist, und dieser Winkel zwischen H_e und H_i gemäß vorstehenden Ausführungen gleich

$$70° + 30° - \varphi - 10° = 90° - \varphi$$

ist, wobei φ der Phasenwinkel zwischen wirksamem Strom und zugehöriger Sternspannung ist, so ist das Drehmoment des Zählers hierdurch proportional $E J \cos \varphi$, d. h. proportional der Leistung, welche in den drei gleichbelasteten Zweigen verbraucht wird. Der wirkliche Betrag und die Konstante des Zählers ergeben sich aus dem Koeffizienten $1{\cdot}732 = \sqrt{3}$.

120. Nullpunktschaltung von Landis & Gyr.

Im Gegensatz zu diesen beiden Konstruktionen arbeiten verschiedene andere Firmen mit einem künstlich geschaffenen Nullpunkt und möge Fig. 133, die den von der Firma Landis & Gyr, Zug (Schweiz), für diese Messung gleichbelasteter Dreiphasennetze hergestellten Zähler darstellt, als Beispiel dieser Apparate dienen. Wie aus der Figur hervorgeht, ist die Spannungsspule, die also die volle Sternspannung auf sich nimmt, direkt in Stern mit 2 Drosselspulen geschaltet, und wird hierdurch in dem Vereinigungspunkte der drei Spulen der gewünschte künstliche Nullpunkt geschaffen. Die Konstruktion ist etwas kräftiger gehalten als der Einphasenzähler derselben Firma, ist aber sonst durchaus gleichartig entworfen und ausgeführt.

4. Mehrphasenzähler für beliebige Belastung der Phasen.

121. Verschiedene Meßmethoden.

Von den verschiedenen seit Entdeckung der Drehfelderscheinungen durch Ferraris-Tesla vorgeschlagenen und angewendeten Mehrphasensystemen kommt heute praktisch nur noch das Dreiphasensystem, kurz, wenn auch ungenau Drehstrom benannt, in seinen beiden Schaltungen als Dreiphasendreileiter- und Vierleitersystem in Frage. Ursprünglich nur als Dreileitersystem ausgeführt, ergab sich in der Praxis, namentlich bei größeren Werken mit gemischtem Licht- und Kraftbetrieb die an Notwendigkeit eng angrenzende Zweckmäßigkeit, zum Ausgleich der stark wechselnden Belastung und zur Milderung ihrer Einwirkung auf den gleichmäßigen Lichtbetrieb eine besondere Ausgleichs- oder neutrale Rückleitung anzubringen. Nach diesem System sind viele neuere Zentralen gebaut.

Hinsichtlich der Messung eines gleichmäßig belasteten Dreiphasensystemes sind bereits in dem Kapitel Nr. 26, Einteilung der Elektrizitätszähler, die hauptsächlichen beiden Schaltungen der Dreiwattmeter- und Zweiwattmeter-Methode angegeben. Es wurde dort schon erwähnt, daß für ein beliebig belastetes Drehstrom-Dreileitersystem die Zweiwattmeter-Methode ohne jeden Zweifel die vollkommenste und einfachste Lösung der Aufgabe bietet. Lediglich die durch das hierauf Aron erteilte Patent geschaffene Monopolstellung seiner Firma veranlaßte die anderen Konkurrenzfirmen, ähnliche andere Methoden aufzufinden, nach welchen sich die Energie eines beliebig belasteten Dreiphasensystemes ebenfalls messen läßt. In einem Dreiphasennetz, namentlich bei Widerstandskombinationen in Dreieck- und Sternschaltung, lassen sich die einfachen Ströme und Spannungen, Stern- wie Dreiecksspannungen, stets durch Summen- oder Differenzwirkung von Strömen und

Spannungen der anderen Phasen ohne weiteres ersetzen, und ergeben sich daraus sehr viele Abweichungen und Modifikationen der reinen Zweiwattmeter-Methode, ohne die Einfachheit derselben zu erreichen, geschweige denn zu übertreffen. Die Richtigkeit dieses Satzes ist inzwischen durch die Praxis erwiesen, indem nach dem Erlöschen des betr. Aronschen Patentes mit geringen Ausnahmen alle Firmen zur Anwendung dieser Zweiwattmeter-Methode über- oder vielmehr zurückgegangen sind. Zur Orientierung über diese verschiedenen mehr oder minder komplizierten Schaltungen und Meßmethoden, deren keine die Einfachheit der Aronschen Schaltung erreicht, und die daher heute fast nur noch historisches Interesse besitzen, sei auf die im Vorwort angeführten früheren Publikationen und die verschiedenen Patentschriften und Jahrgänge der Zeitschriften verwiesen.

Die Messung eines beliebig belasteten Dreiphasensystemes erfolgt daher fast ausschließlich durch Kombination der Meßsysteme zweier Einphasenzähler, deren Hauptstrom- und Nebenschlußwickelungen nach Art der Zweiwattmeter-Schaltung miteinander verbunden sind. In rein konstruktiver Beziehung ist man gezwungen den Abstand dieser beiden Meßsysteme nicht unterhalb einer gewissen Grenze zu vermindern, da sonst eine unzulässige Einwirkung des einen Systemes auf das andere bei sehr ungleichmäßiger Belastung des Netzes zu befürchten ist. Aus diesem Grunde muß man eine entsprechend große Ankerscheibe benutzen, wofern man nicht, wie dies in einigen Konstruktionen geschieht, zwei Scheiben anwendet, welche also zwei auf dieselbe Achse einwirkende Einphasenzähler bilden. Noch weiter geht Aron in seinem neueren Drehstrom-Induktionszähler, indem er zwei mechanisch vollkommen getrennte Induktionszähler mit zwei Ankerscheiben und getrennten Meßsystemen benutzt, welche ihre Angaben nach Art der beiden Meßsysteme seines Umschaltzählers durch ein Planetenradgetriebe auf ein gemeinsames Zählwerk übertragen.

Eine von der Aronschen Zweiwattmeter-Methode abweichende verwendet die A.E.G. noch heute, bei der nur eine Spannung in beiden Meßsystemen des Zählers benutzt wird. Dieselbe ist im Nachstehenden bei der Betrachtung des A.E.G.-Zählers näher erläutert.

123. Drehstrom-Vierleiter-zähler.

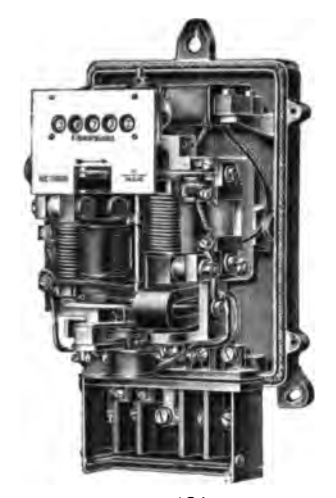
Was schließlich die neueren Dreiphasen-Vierleiterzähler anlangt, so ist bereits von Aron zu diesem Zweck (s. Nr. 43) eine entsprechende Schaltung angegeben. Eine Abänderung derselben wurde von der s. Z. Union-Elektrizitätsgesellschaft bekannt gegeben. Neue genauere Untersuchungen haben jedoch den Nachweis erbracht, daß diese kombinierten Methoden nur unter bestimmten, in Praxis wiederum nicht immer erfüllten Bedingungen genaue Resultate ergeben. Ein solches grundsätzlich richtiges Ergebnis kann in diesem Falle des Dreiphasensystemes mit neutraler Rückleitung nur durch Anwendung der Dreiwattmeter-Methode in getrennten messenden Systemen erreicht werden. Infolgedessen werden neuerdings diese von vielen Firmen hergestellten Drehstrom-Vierleiterzähler fast stets mit drei messenden Systemen ausgerüstet.

In rein mechanischer Beziehung wird daher ein Drehstromzähler, insbesondere ein solcher für vier Leitungen, immer komplizierter und teurer ausfallen als ein Einphasenzähler. Die in ihm notwendigen beiden Spannungssysteme haben im Mittel einen höheren Eigenverbrauch wie diejenigen eines Einphasenzählers für gleiche Kilowattleistung, das bewegliche System selbst wird schwerer als dasjenige eines Einphasenzählers ausfallen. In seinem

übrigen Verhalten und Konstruktion sind keinerlei bemerkenswerte Unterschiede dem Einphasenzähler gegenüber vorhanden. Nachdem diese bereits im Vorgehenden eingehender erläutert sind, genügt es, einige Beispiele moderner Drehstromzähler kurz zu beschreiben.

123. Siemens-Schuckert Werke.

Die Siemens-Schuckert Werke lassen zum Zweck der genauen Messung eines beliebig belasteten Drehstrom-Dreileitersystemes zwei magnetische Triebsysteme auf zwei Ankerscheiben einwirken, welche an der gleichen Achse angebracht sind und so das auf sie ausgeübte Drehmoment summieren. Die beiden Triebsysteme sind mit demjenigen des bereits beschriebenen neueren Einphasenzählers derselben Firma identisch. Die Zähler werden in zwei Ausführungsformen je nach Wunsch mit Schüttelmagneten oder gewöhnlichem federndem Fußlager ausgeführt. Fig. 134 zeigt einen



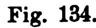


Fig. 134.



Fig. 135.

solchen mit Schüttelmagneten am unteren Fußlager ausgerüsteten Zähler in geöffnetem Zustande, Fig. 135 einen solchen mit gewöhnlichem Fußlager.

Für Messung von Dreiphasennetzen mit neutraler Rückleitung werden nach einer der Firma geschützten Schaltung vier Triebsysteme an zwei an derselben Achse befestigten Aluminiumscheiben zur Einwirkung gebracht. Gleichgültig bei welcher Belastung, induktiv oder induktionsfrei oder in den einzelnen Phasen verschieden, mißt der Zähler bei jeder Belastung die tatsächlich verbrauchte Energie.

124. Isaria-Zähler-Werke.

Die Isaria-Zählerwerke G. m. b. H., München, bauen ebenfalls zwei Drehstromzählertypen für Drei- und Vierleiternetze. Bei dem mit zwei kombinierten Einphasensystemen neuester Konstruktion dieser Firma (s. Nr. 114) ausgerüsteten Dreileiter-Drehstromzähler sind die beiden Triebsysteme nach der Zweiwattmeter-Methode geschaltet. In der neuerdings auch für Vierleitersysteme gelieferten Ausführung sind drei messende Systeme enthalten.

125. Felten & Guilleaume-Lahmeyer-Werke.

Die Felten & Guilleaume-Lahmeyer-Werke bringen ebenfalls gemäß der Abbildung in Fig. 136 bei ihrem Drehstromzähler an derselben Achse zwei Kurzschlußarmaturen an, zwischen denen die besondere Bremsscheibe, von zwei permanenten Magneten beeinflußt, und das Zählwerk angebracht ist. Strom- und Spannungsspulen der beiden Meßsysteme sind in Zwei-

wattmeter-Schaltung miteinander verbunden. Bei Drehstromzählern für Vierleitungen kommen drei Meßsysteme, wiederum mit separater Wirbelstrombremse zur Anwendung.

126. A.-G. Mix & Genest.

In gleicher Weise verfährt die Firma A.-G. Mix & Genest, Berlin, mit ihren Drehstromzählern für drei und vier Leitungen, von welch letzterer Art





Fig. 136.

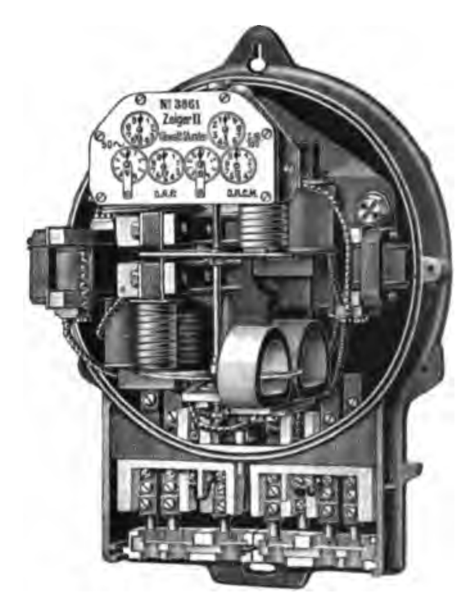


Fig. 137.

Fig. 137 eine Abbildung gibt. Es wirken hier auf die obere Kurzschlußscheibe zwei Triebsysteme, auf die untere das dritte Triebsystem und zwei Dämpfungsmagnete.

127. Landis & Gyr.

Ebenso baut die Firma Landis & Gyr, Zug, ihre Drehstromzähler nach der Zwei- und Dreiwattmeter-Methode, je nachdem dieselben in einem

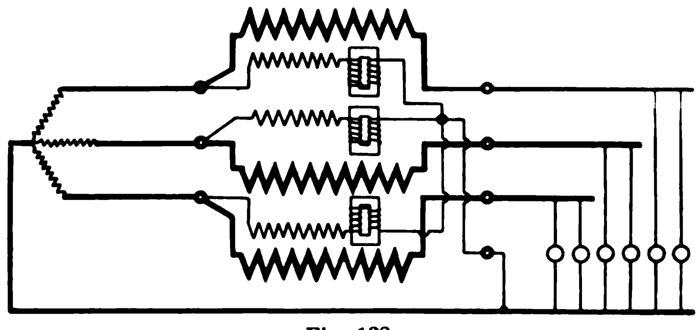


Fig. 138.

solchen Drei- oder Vierleiternetz Verwendung finden sollen. Die Fig. 138, 139 und 140 geben Schaltung, schematische Darstellung und Gesamtausführung eines solchen Dreiphasen-Vierleiterzählers wieder.

128. H. Aron El.Z.-Fabrik.

Dem gegenüber verzichtet Aron in seinem Drehstromzähler Type A-M darauf, an derselben Kurzschlußscheibe oder auch an zwei an der gleichen Achse befestigten Kurzschlußscheiben das wirksame Drehmoment anzubringen.

Er bringt vielmehr gemäß Fig. 141 und 142 in einem und demselben Zählergehäuse zwei vollkommen voneinander mechanisch und elektrisch unabhängige

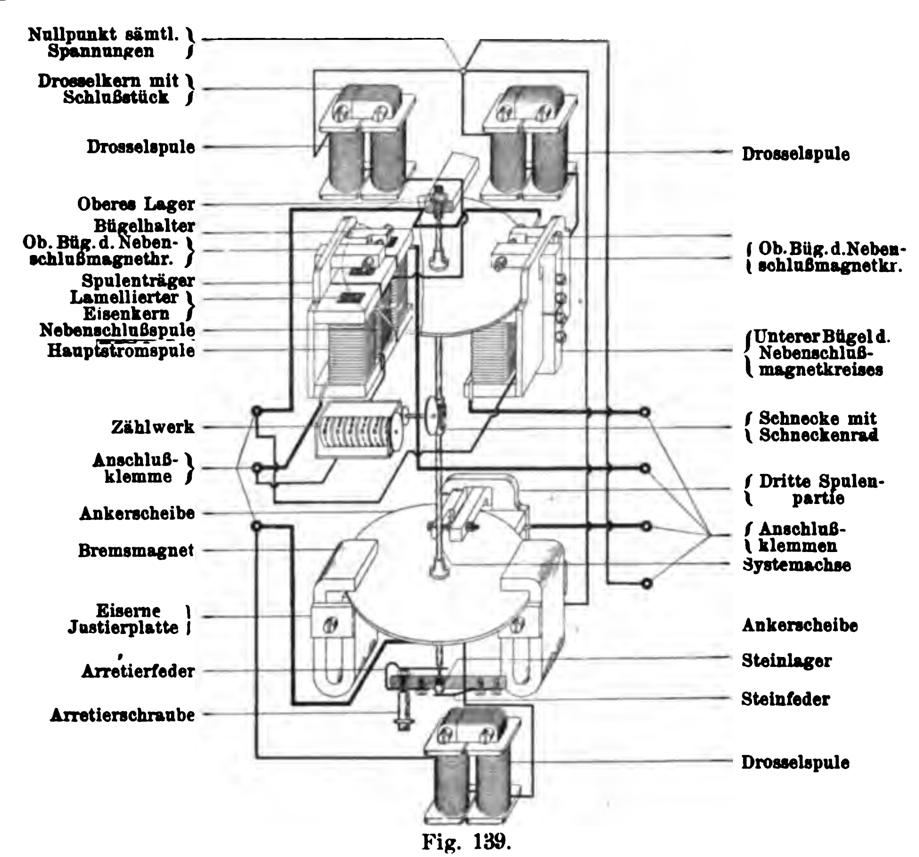


Fig. 139.

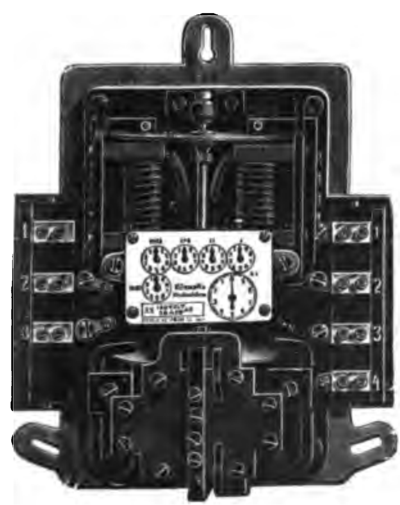


Fig. 140.

Einphasenzähler an, welche lediglich auf ein gemeinsames mechanisches Zählwerk einwirken. Der hierdurch etwas kompliziertere mechanische Aufbau wird durch die Genauigkeit der Messung und vollkommene Unabhängigkeit der beiden Systeme voneinander ausgeglichen.

129. Allg. Elektr. Gesellschaft.

Eine wesentlich abgeänderte Schaltung der Zweiwattmeter-Methode, mit beiden Systemen gemeinsamer Spannung, verwendet die Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft in ihren Drehstromzählern, welche in Fig. 143, 144 und 145 in Schaltung, Vorderansicht und Querschnitt wiedergegeben sind. Die beiden aus dem gleichen dreizinkigen Triebkern wie in den Einphasenzählern der Firma gebildeten Triebsysteme werden in der Mittelzinke von dem Starkstrom erregt und zwar je ein System von einer Stromphase. Von den beiden Triebkernen F_1 und F_2, Fig. 143, trägt der

rechte F_2 außerdem noch eine besondere Kurzschlußwickelung, durch welche die Phase dieses Starkstromes um annähernd 30° verzögert wird. Im Gegensatz zu sämtlichen anderen Konstruktionen wird nun bei diesem A.E.G.-Dreh-

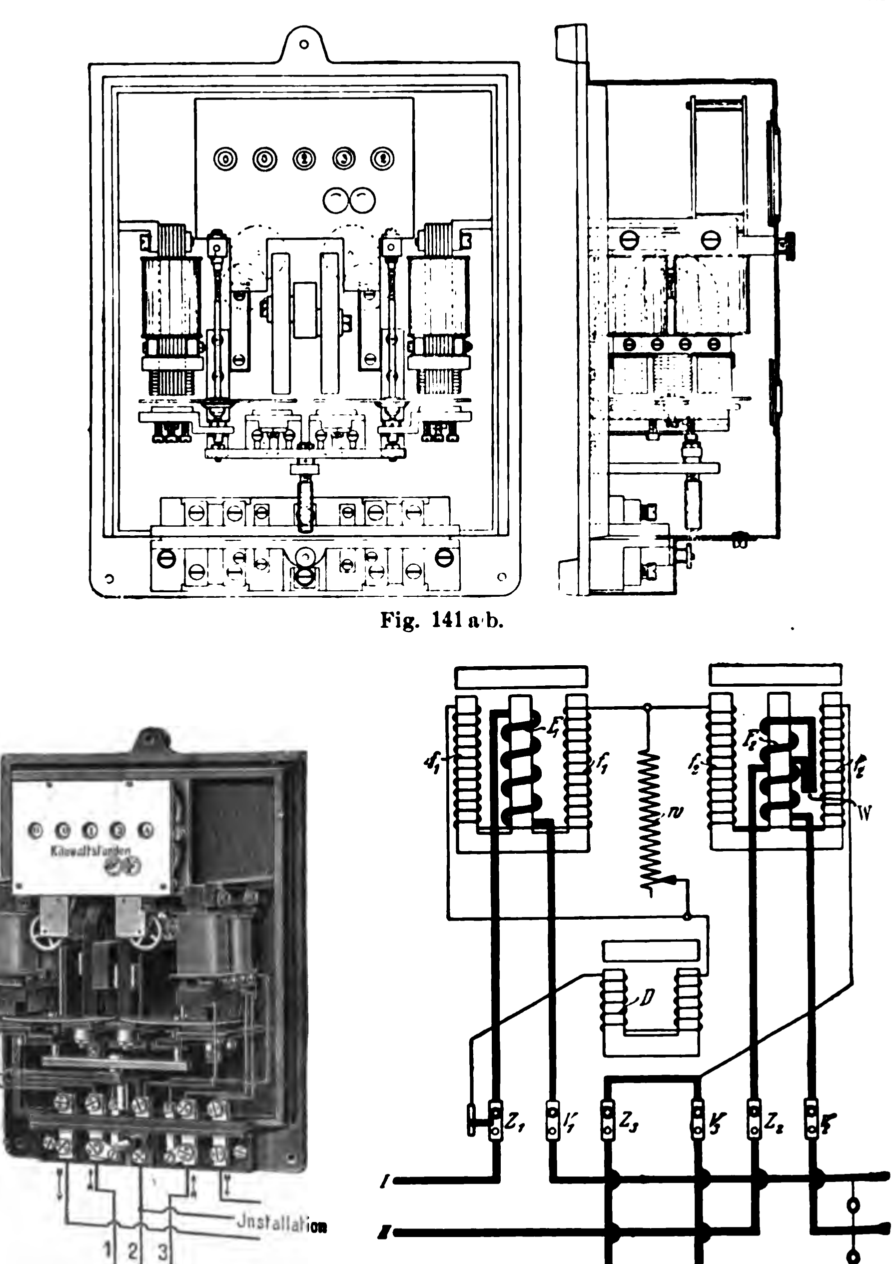


Fig. 141 a/b.

Fig. 142.

Fig. 143.

stromzähler das Spannungssystem beider Triebkerne in Hintereinanderschaltung mit einer Drosselspule von einer der Phasenspannung erregt. Es liegt jedoch in HUMMELscher Schaltung parallel zu der Spannungswickelung des linken Triebkernes ein regulierbarer induktionsfreier Widerstand, welcher

die Phasendifferenz zwischen Starkstrom- und Spannungsfeld in diesem Triebsystem auf vollkommen eine Viertelperiode abzugleichen gestattet. Es muß nun noch die gleiche Abgleichung auf 90^0 zwischen dem resultierenden Felde des rechten Starkstrommagneten und dem dazugehörigen Spannungsfelde erzielt werden. Letzteres ist zunächst durch die ihm innewohnende Selbstinduktion um einen gewissen Winkel φ gegen die Spannung I, III verzögert. Die Phase des bei alleiniger Belastung des Zweiges II, III den

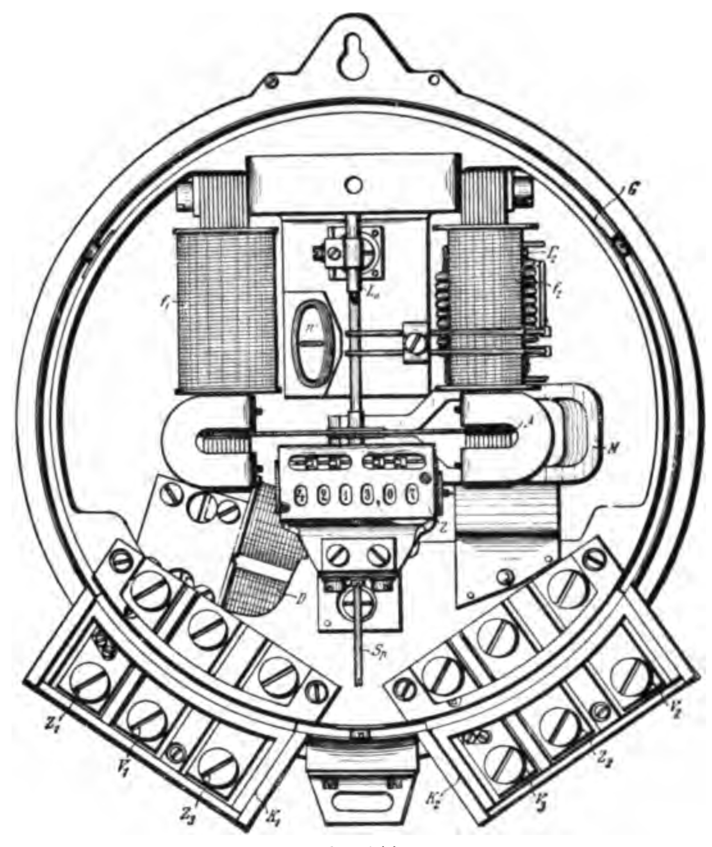


Fig. 144.

rechten Hauptstrommagneten erregenden Stromes und damit praktisch auch die des von ihm erzeugten Feldes ist dagegen um 120^0 gegen jene Spannung I, III verzögert. Um diese beiden Felder aufeinander senkrecht zu stellen, dient die auf dem Hauptstrommagneten angebrachte Kurzschlußwindung, die aus 10 Windungen eines ca. 1·8 mm starken Kupferdrahtes besteht und in ihrem Widerstand durch einen kleinen angefügten Widerstand aus Konstantandraht zu regulieren ist. Stellt man diesen Widerstand so ein, daß die in der Wickelung erzeugten Kurzschlußströme das Feld um $\varphi - 30^0$ verzögern, so erhält man den gewünschten Phasenunterschied beider Felder um genau 90^0. Auf diese Weise mißt auch das zweite Triebsystem infolge der Abgleichung auf 90^0 die andere Hälfte der Energie, der Zähler daher nach dieser geänderten Zweiwattmeter-Methode die in dem betr. Dreiphasennetz insgesamt verbrauchte Energie. Die übrige Konstruktion des Zählers ist durchaus nach

gleichen Grundsätzen durchgeführt wie die des bereits beschriebenen Einphasenzählers. Die Verwendung nur einer Spannung vereinfacht die Schaltung beträchtlich, erhöht die Betriebssicherheit und vermindert den Eigenverbrauch.

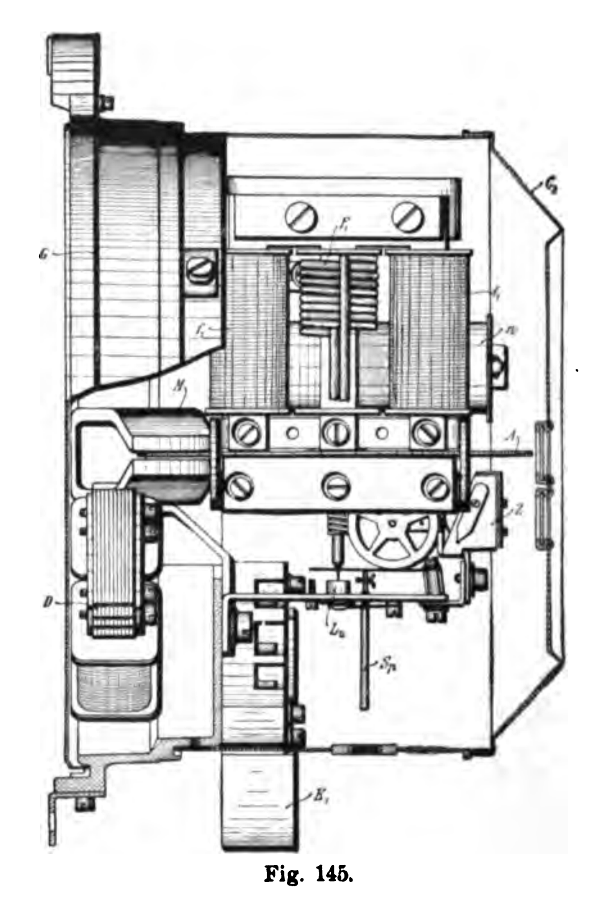


Fig. 145.

Von den zu beiden Seiten des Apparates vorhandenen je drei Anschlußklemmen sind die mittleren gemäß Fig. 143 stets miteinander kurz geschlossen.

IV.

Zähler für besondere Zwecke.

A. Zeitzähler.

Allgemeines.

180. Zweck und Wirkungsweise.

Es gibt eine Anzahl von Fällen, in denen der gewöhnliche Wattstundenzähler teilweise nicht notwendig ist, teilweise sich auch durch seine Anschaffungskosten verbietet. Ist ein Motor z. B. zum Antrieb einer praktisch stets dieselbe Kraft erfordernden Maschine bestimmt, so kann sein Stromverbrauch mit ausreichender Genauigkeit als gleichmäßig angenommen werden, und genügt zu dessen Messung eine einfache Summierung der Zeit, während welcher der Motor eingeschaltet ist. Ebenso liegen die Verhältnisse bei einer Anzahl anderer Stromverbrauchapparate, bei denen ebenfalls ein praktisch gleichmäßiger Stromkonsum anzunehmen ist. Hierzu gehören einzeln brennende Lampen, Heizapparate, Ventilatoren usw., kurzum solche Apparate, welche entweder der Natur der Sache nach einen gleichmäßigen Stromkonsum haben, wofern eben die Netzspannung der betr. Anlage genügend konstant gehalten wird, oder bei denen durch Weglassung irgend eines Schalters oder Regulators eine Abänderung dieses Stromkonsums, namentlich eine Vergrößerung, ausgeschlossen ist, auch durch Sicherungen verhindert werden kann.

Wie bereits bei den Amperestundenzählern erwähnt wurde, haben eine Reihe kleinerer Zentralen ein wesentliches Interesse daran, zur Vergrößerung des Absatzes selbst verhältnismäßig wenig Strom verbrauchende Konsumenten hinzuzugewinnen, vorausgesetzt nur, daß die Kosten der Installation und deren Unterhaltung nicht zu hohe werden. Da bei diesem Posten die Zählermiete und bei der Installation selbst der Zählerpreis ausschlaggebend ist, so sind sehr oft selbst die billigeren Amperestundenzähler hierfür zu teuer. Mit dem reinen Pauschalpreis kommt die Zentrale meist zu schlecht weg, da alsdann die Abnehmer von dem ihnen zustehenden Recht der beliebig großen Stromentnahme ausgiebigen Gebrauch machen. Ist jedoch eine Änderung der ursprünglichen Installation ausgeschlossen, bzw. eine Hinzufügung neuer Stromverbrauchsapparate praktisch nur sehr schwer durchzuführen, und mit entsprechender Strafe bedroht, so wird eine genügend genaue Messung durch einen Zeitzähler zu erzielen sein, ebenso wie bei den vorher besprochenen Apparaten mit gleichbleibender Belastung.

Man versteht unter einem Zeitzähler eine Uhr, welche für gewöhnlich durch eine mechanische Hemmvorrichtung festgehalten und nur die Zeit über in Gang ist, während welcher der Anlage Strom entnommen wird. Zu diesem Zweck ist dieselbe mit einer Entarretierungsvorrichtung versehen, meistens direkt an der Unruhe angreifend, welche durch Einschaltung des Stromes betätigt wird. Aus diesem Grundprinzip des Zeitzählers ergeben sich die bei seinem Entwurf zu beobachtenden maßgebenden Gesichtspunkte.

Das Uhrwerk wird in den meisten Fällen mechanisch betätigt und verwendet man hierzu, um eine möglichst geringe Bedienung des Apparates zu erhalten, gute Gangwerke von ca. 300 Stunden Dauer. Alsdann muß die Uhr mechanisch wieder aufgezogen werden. Bei einer im regelmäßigen Turnus ausgeführten Ablesung des Zählers dürfte die Gefahr, daß das Aufziehen der Uhr unterbleibt, praktisch nicht schwer wiegen. Allerdings ist ein elektrischer Antrieb des Uhrwerkes selbst genau wie bei den Uhrenzählern von großem Vorteil, denn in diesem Falle ist ein regelmäßiges Funktionieren der Uhr von der Bedienung völlig unabhängig und weiter nach der Richtung, daß sie bei ausgeschaltetem Strom still steht, dadurch vollkommen gewährleistet, daß eben der Strom selbst die antreibende Kraft liefert. Diesem Gedankengang folgend, führt das Schiersteiner Metallwerk, G. m. b. H., Berlin, welches den Bau von Zeitzählern als Spezialität betreibt, seine sämtlichen Apparate mit elektrischem Antrieb aus, wie im Folgenden noch näher gezeigt wird.

Von weiterer wesentlicher Bedeutung ist die Frage, wie die Auslösung des Uhrwerkes bei Stromschluß erfolgen soll. Es sind für gewöhnlich drei Wege gangbar. Man kann mechanisch die Drehung des die betr. Anlage in Betrieb setzenden Schalters dazu benutzen, das Uhrwerk freizugeben. Diese rein mechanische Methode, wie sie z. B. von der A.E.G. ausgeführt wird, besitzt zweifellos den Vorzug der Einfachheit und Sicherheit. Als Unbequemlichkeit ist zu betrachten und schließt die Verwendung dieser mechanischen Entarretierung in manchen Fällen aus, daß Schalter und Zähler miteinander kombiniert sein müssen.

Für die weiterhin mögliche elektrische Betätigung des Zeitzählers sind die beiden Möglichkeiten vorhanden, diese Loskuppelung der Unruhe von ihrer Sperrvorrichtung durch einen vom Verbrauchsstrom oder aber durch die Spannung erregten Elektromagneten auszuführen. Während für kleinere Anschlüsse der Verbrauchsstrom selbst hierzu zweckmäßig verwendet wird, benutzt man bei größeren Energiemengen wie bei Motorenbetrieb hierzu die Spannung. Bezüglich der Verwendung des Hauptstromes ist zu berücksichtigen, daß der betr. Elektromagnet für seine Betätigung eine gewisse Energie nötig hat, letztere aber wiederum von der maximalen Lampenzahl abhängig ist. Es sind also Mindeststromstärke, wie dieselbe zur Betätigung des Apparates nötig ist, und Maximalbelastung, für welche der Zähler noch anwendbar ist, in gegenseitiger Abhängigkeit. Man kann daher einen solchen Stromschalter nur für bestimmte Meßbereiche verwenden. Diese Beschränkung fällt bei der Spannungserregung fort. Bezüglich der genauen Stromstärke, bei welcher der Zeitzähler anspricht, ist weiter zu beobachten, daß die in dem Elektromagneten wirksame Remanenz oder Hysteresis den Betrag dieser Stromstärke bei zu- oder abnehmendem Strome etwas ändert. Diesem Umstand ist bei der neueren Konstruktion des Zeitzählers der Felten & Guilleaume-Lahmeyer-Werke, Frankfurt a. M., durch einen Ausgleich

mittelst einer besonderen Hilfsfeder Rechnung getragen. Für die Anwendung der Spannung ist zu bemerken, daß der Zähler hinter dem Schalter angebracht werden muß. Das in diesem Punkte bei den gewöhnlichen Wattstundenzählern vorhandene Bedenken, daß alsdann zwischen Zähler und Schalter Energie entnommen werden könnte, die der Zähler nicht registriert, ist hier hinfällig, da in diesem Falle der Zähler, weil rein durch die Spannung betätigt, trotzdem arbeitet. Bei dem Wattstundenzähler wäre dies nicht der Fall, da alsdann eine Erregung der Starkstromspule fortfiele.

131. Sonderanwendungen.

Bezüglich der Anwendung des Zeitzählers sind neuerdings zwei besondere Verwendungsgebiete hinzugekommen, in welchen dieser Apparat bereits gute praktische Erfolge erzielt hat. Es betrifft dies seine Benutzung in Straßenbahnwagen zur Kontrolle der Führer, und seine Verwendung als Maximalmeßgerät bei verschiedenen Tarifsystemen.

Bei der Straßenbahn wird der Stromverbrauch um so günstiger, je gleichmäßiger der Wagen fährt, d. h. je mehr der Fahrer sich an die vorgeschriebene mittlere Geschwindigkeit hält, je weniger Energie er, wie dies bei schnellerem Fahren unvermeidlich ist, durch die beim Einschalten auftretenden starken Stromstöße verbraucht und danach durch schnelleres Bremsen wieder vernichtet. Die Gesamtenergie für den Betrieb des Wagens während eines ganzen Tages oder Monates wird daher um so geringer ausfallen, je länger und daher auch gleichmäßiger der Anlage der Strom entnommen ist. Dies könnte man ziffernmäßig zweifellos am genauesten durch Wattstundenzähler kontrollieren. Bei der fast ausschließlichen Verwendung von Gleichstrom im Betriebe von Trambahnen käme hierfür nur der Gleichstrom-Motorzähler Thomsonscher Bauart in Betracht, wie die betreffende Spezialkonstruktion im Folgenden noch näher beschrieben ist. Nun ist jedoch der Preisunterschied zwischen diesen beiden Gattungen, Wattstundenzähler und Zeitzähler, ein sehr bedeutender, und kann man im Mittel den Preis ersterer als den dreifachen annehmen. Hierzu kommt, daß der Zeitzähler außer dem Vorzug der Billigkeit noch denjenigen der größeren Betriebssicherheit aufweist. Beide gewichtige Gründe lassen die Benutzung von Zeitzählern, sofern es sich nur um die Feststellung der Gesamtzeitdauer der Stromentnahme und damit um die Kontrolle der Wagenführer handelt, als vorteilhafter erscheinen als diejenigen des Wattstundenzählers. Demgemäß hat man an verschiedenen Stellen, wie z. B. in Frankfurt a. M., neuerdings auch in England damit begonnen, in die Tramwagen Zeitzähler zu installieren.

Als Maximalstromapparat hat der Apparat den Zweck anzuzeigen, wie lange Zeit von dem betr. Konsumenten oberhalb einer festgesetzten Maximalgrenze Strom entnommen ist. Hierbei muß also der Apparat in etwas mechanisch geänderter Konstruktion das Uhrwerk erst von einem bestimmten Maximalstrom ab freigeben. Selbstredend kommt für diesen Fall nur die Serienschaltung des Entkuppelungsmagneten in Frage.

Zeitzähler werden von sehr vielen Firmen ausgeführt und seien als Beispiele nachstehend einige Typen bekanntester Bauart beschrieben.

Praktische Ausführungsformen.

132. Felten & Guilleaume-Lahmeyer-Werke.

Der Zeitzähler der Felten & Guillaume-Lahmeyer-Werke, Frankfurt a. M., besitzt als Uhr ein Zylinderwerk bester Ausführung mit einer Gangdauer von ca. 17 Tagen, das jedoch nach Möglichkeit bei dauerndem Betriebe

alle 10 bis 14 Tage aufgezogen werden soll. Der Zähler, siehe Fig. 146 und 147, enthält für die elektrische Betätigung ein an der Platine 7 befestigtes Elektromagnetsystem, welches aus zwei magnetisch getrennten, aber mechanisch miteinander verbundenen Elektromagneten 8 mit einer Hauptstromspule 9, sowie dem zwischen zwei Spitzen drehbar gelagerten Anker, aus ein oder zwei Eisenlamellen 11 bestehend, zusammengesetzt ist. Der Anker trägt einen leichten Hebel 13, der an dem unteren Ende durch das Gegengewicht 14 ausbalanziert ist, und an dem oberen Ende mittelst des Verbindungsstückes 15 eine zarte Feder 16 trägt, die sich gegen einen an der Unruhe 18 befestigten Stift 17 anlegt. Die Bewegung des Hebels 13 ist an dem oberen Ende in der aus Fig. 146 ersichtlichen Weise durch die Schelle 19 in seinem Ausschlage begrenzt, um insbesondere ein Anstreifen der Feder 16 an der Unruhe 18 unmöglich zu machen. Um die erwähnte störende Einwirkung der Remanenz praktisch auszugleichen, befindet sich an der rechten Seite des Hebels 13 die Doppelfeder 21, deren Spannung von außen durch die Vierkantschraube 4 innerhalb gewisser Grenzen zu regeln ist. Diese Doppelfeder nimmt beim Einschalten des Stromes einen Teil der Energie des Elektromagneten auf sich und gibt dieselbe nach dem Ausschalten des Stromes resp. seiner Verminderung unter 8 % der Maximalbelastung wieder frei, und bringt dadurch den Hebel in seine Endstellung und damit die Uhr zum Stillstand. Bei Einschaltung des Stromes wird der Anker 11 durch die beiden Elektromagnete in die Verbindungslinie ihrer Pole gezogen, der Hebel 13 gibt dem Zuge folgend das Echappement frei und die Uhr läuft. Der Elektromagnet ist derart dimensioniert, daß er bei 10 % der Vollast sicher anspricht. Doch ist, wie erwähnt, durch eine Öffnung der Kappe mittelst der Vierkantschraube 4 die Feder 21 so zu spannen, daß die Uhr erst bei einer größeren Stromstärke ausgelöst wird, und zwar bewirkt ein Rechtsdrehen der Schraube 4 im Sinne der Uhrzeigerbewegung, daß der Zähler erst bei höherer Belastung angeht. Zum Schutze der Regulierschraube gegen unbefugte Betätigung ist an der äußeren Kappe ein drehbarer Hebel angebracht, der in seiner Endstellung plombiert wird. Diese Zeitzähler sind

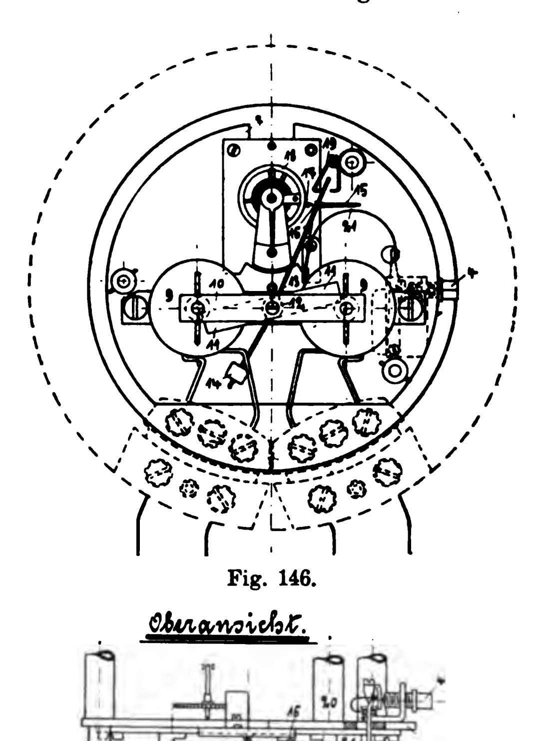

Fig. 146.

Fig. 147.

ohne weiteres für Gleich- wie für Wechselstrom verwendbar, sobald sie nicht später als bei ca. 30 % ihrer Belastung die Anzeige beginnen sollen.

Dieser Zähler wird ferner für Tarifzwecke anwendbar gebaut. Wie bei den im Folgenden noch beschriebenen Doppeltarifzählern auseinandergesetzt wird, ist es bei den neueren den wirtschaftlichen Bedingungen einer Zentrale mehr angemessenen Tarifsystemen von großer Wichtigkeit zu wissen, mit welcher mittleren, bezw. maximalen Belastung der Konsument die Zentrale in Anspruch nimmt, und für welche Zeitdauer. Der Zeitzähler dient in diesem Falle dazu, die Zeit festzustellen, während welcher eine bestimmte Belastung der Anlage unterhalb des zulässigen Maximums, etwa zwischen 30 bis 100 % liegend, vorhanden war, oder um unter Vernachlässigung der kleinen Belastungen bis zu 10 % die mittlere Stromstärke festzustellen, die sich durch Division der Angaben des Wattstundenzählers durch diejenigen des Zeitzählers ergibt. Je nach dem Wunsche des Bestellers wird der Zeitzähler für eine bestimmte Zwischenbelastung justiert. Ohne solche Angabe wird der vorliegende Zähler für Tarifzwecke bei Gleichstrom mit einer Regulierfähigkeit zwischen 10 bis ca. 70 % geliefert, bei Wechselstrom zwischen 10 bis ca. 50 %.





Fig. 148.

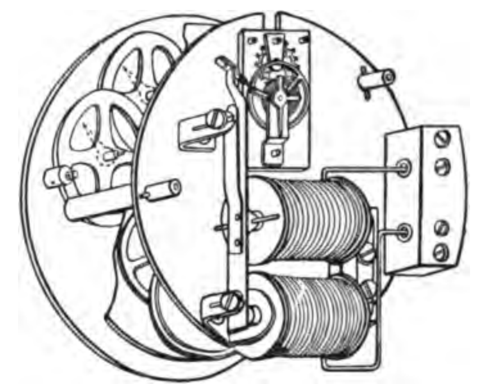


Fig. 149.

Der Zähler wird auch für Spannungserregung ausgeführt und besitzt bei 110 Volt ca. 8000 Ohm, bei 220 Volt ca. 15000 Ohm inneren Widerstand. Die äußere Ausführung des Zählers ist aus Fig. 148 zu ersehen, welche auch links die Plombe für die Vierkantregulierschraube erkennen läßt. Der Zähler wird fernerhin genau wie ein Wattstundenzähler für Zwei- und Dreileiterstrom ausgeführt und ist hierbei seine Montage und Schaltung die gleiche, wie der entsprechenden Wattstundenzähler.



133. Allg. Elektr. Gesellschaft.

Fig. 149 zeigt die Ausführung des von der A.E.G. hergestellten Zeitzählers, Fig. 150a und b die mechanische Betätigung desselben, Fig. 151a und b die elektromagnetische Betätigung in Reihenschaltung, Fig. 152 die Gesamtausführung als elektromagnetisch betätigter Zähler für Betriebsstunden. Fig. 149 läßt ohne nähere Erläuterung erkennen, wie der Elektromagnet den gemäß Fig. 151 gelagerten Anker bei Stromschluß zum Anliegen an seine beiden Pole bringt und hierdurch die bis dahin gehemmte Unruhe des mechanisch angetriebenen Uhrwerkes freigibt. Fig. 150 gibt an Stelle dessen die rein mechanische Betätigung des Zeitzählers wieder. In jedem Falle ist ein Uhrwerk, für 300 stündige Gangdauer eingerichtet, vorhanden, welches durch mit der Ablesung der Zähler betraute Beamte periodisch aufgezogen wird.

Der Zeitzähler mit rein mechanischer Betätigung bietet den Vorteil, daß keine untere Grenze der Anlaufsstromstärke besteht, da ja die von Hand geschehende Drehung des Schalters gleichzeitig die Auslösung des Zählers bewirkt. Daher können diese Zähler für beliebig hohe Stromstärken gebaut werden. Dem steht als Unbequemlichkeit die unbedingt notwendige mechanische Kombination von Schalter und Zähler gegenüber. Die hiervon freien Zähler mit elektromagnetischer Betätigung sind dagegen in ihrem Meßbereich im Verhältnis 1 : 10 bezüglich der Mindeststromstärke und Maximalbelastung bestimmten Beschränkungen unterworfen. Die Spannungserregung des Zählers mittelst doppelpoligen Schalters wird meistens bei Motorbetrieb gewählt. Hierbei ist der Zähler natürlich von irgend welchen Belastungsschwankungen unabhängig. Auch die A.E.G. liefert Maximalstrom-Zeitzähler, welche zwischen 40 bis 100 % der Kapazität für Gleich- und Wechselstrom einstellbar sind.

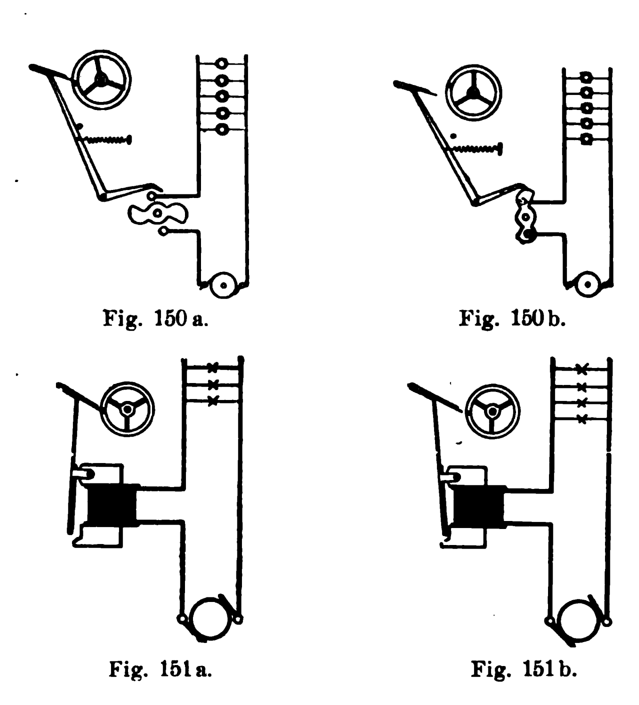


Fig. 150 a. Fig. 150 b.

Fig. 151 a. Fig. 151 b.

134. Isaria-Zählerwerke. Auch die Isaria-Zählerwerke, G. m. b. H., München, bauen Zeit- und Maximalstromzähler, deren Antrieb rein mechanisch durch ein Uhrwerk Schwarzwälder Herkunft von ca. 300 Stunden Gangdauer geschieht. Die Auslösung der Uhr geschieht nur elektromagnetisch und zwar für Stromstärken bis 30 Ampere in Reihenschaltung, darüber hinaus bei Motorenanschlüssen im Nebenschluß durch die Spannung. Auch hier beginnen die Zähler bei ungefähr 10 % der Maximalbelastung an zu zeigen. Besonderes Gewicht ist auf die Konstruktion des Relais gelegt worden, um den Anker nach Ausschaltung, bzw. Aufhören der betr. zu registrierenden Belastung sofort von dem Magneten abzuziehen, d. h. die Uhr selbst zum Stillstand zu bringen.



Fig. 152.

135. Sch... Im Gegensatz zu diesen Konstruktionen glaubt das Schiersteiner ..llwerk, Berlin, im Interesse der Betriebssicherheit, unabhängig ..r Sorgfältigkeit der Bedienung, von dem rein mechanischen Antrieb

des Zählers absehen zu müssen und verwendet Motorzeitzähler, d. h. mit motorischem Antrieb der Gangregelung. In ähnlicher Weise wie bei dem selbsttätigen Aronschen Uhrenaufzug kommen hierbei Schwankungen der Betriebsspannung, durch welche die Betätigung meistens erfolgt, auf die Zeitabgaben außer Wirkung, da ja die Schwingungsdauer der betr. Unruhe innerhalb der gewählten praktischen Grenzen durch kleine Schwankungen der Antriebskraft unbeeinflußt bleibt. Der Motor wird zweckmäßig für Gleichstrom anders gebaut wie für Wechselstrom. Man benutzt zu diesem Zweck als Gleichstrommotor einen von der Betriebspannung erregten und in dem Felde eines permanenten Magneten umlaufenden leichten Anker, in Wechselstromanlagen einen kleinen Asynchronmotor, siehe Fig. 153, der aus



Fig. 153.



Fig. 154.

einer in dem Felde eines einfachen Wechselstrommagneten drehbaren Metallscheibe besteht. Das erforderliche Dreh- oder Wanderfeld wird durch teilweise Abblendung eines Teiles dieses Wechselfeldes durch eine Kurzschlußwindung erzeugt. Es ist aus der Figur ersichtlich, wie diese drehbare Ankerscheibe ihre Bewegung durch eine biegsame Welle in Form einer einfachen Drahtspirale auf das darüber befindliche Uhrwerk überträgt, welche das Resultat, die Betriebsstunden, an springenden Ziffern anzeigt. Außer diesen Zählern mit rein motorischem Antriebe baut die gleiche Firma noch solche mit elektromagnetischem Aufzug in sehr gedrängter Form, wie die Abbildung 154 erkennen läßt.

Dieser mit besonderem Vorteil für die Kontrollierung des Stromverbrauches von Straßenbahnen anzuwendende Zeitzähler kann weiterhin dazu dienen, den von den Wagenführern sowohl bei der Serienschaltung wie bei der Parallelschaltung der Motoren verbrauchten Strom getrennt anzuzeigen. Statt hierfür zwei besondere Zeitzähler zu benutzen, hat die Firma zu diesem Zweck mit Rücksicht auf die Anschaffungskosten sowie auf den in solchen Wagen meistens nur in sehr bescheidenem Maße zur Verfügung stehenden Raum einen Doppelzeitzähler konstruiert, der in Fig. 155 und 156 in der Gesamtausführung und Schaltungsschema wiedergegeben ist. Es ist bei der im übrigen mit dem gewöhnlichen Gleichstrom-Zeitzähler identischen Konstruktion durch Anwendung entsprechender Vorschaltwiderstände die Spannung an den Bürsten auf 4 Volt, der Eigenverbrauch des Zählers auf nur 8 Milli-

amperes herabgedrückt. Der Draht für den sehr hohen Vorschaltwiderstand ist, wie aus Fig. 155 ersichtlich, auf Porzellanrollen mit Unterabteilungen aufgewickelt. Die 3 Klemmen des Zählers werden gemäß Fig. 156 mit der übrigen Motorschaltung verbunden und wird durch zweckmäßige Bemessung der Vorschaltwiderstände dafür gesorgt, daß bei Reihenschaltung der Motoren nur der Zähler I, bei Parallelschaltung nur der Zähler II anzeigt. Der Zähler kann an beliebiger Stelle im Wagen untergebracht werden. So geschieht dies z. B. zweckmäßig unterhalb der zu den Decksitzen des Wagens führenden Treppe, da er hier geschützt und bequem ablesbar angebracht

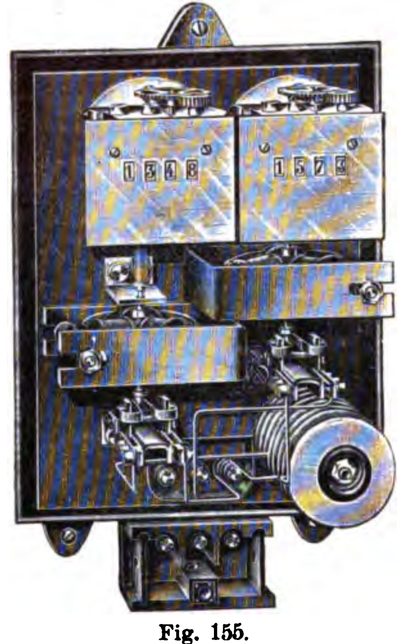


Fig. 155.

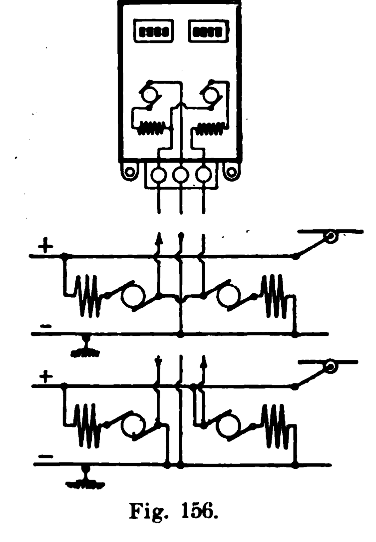


Fig. 156.

ist. Der sehr geringen Stromstärke des zu seinem Betriebe erforderlichen Stromes wegen können zu seiner Verbindung mit den Motoren beliebige. wenn nur entsprechend gut isolierte Drähte verwendet werden.

Die Firma verwendet weiterhin besondere Sorgfalt auf die Durchbildung und Anwendung dieser Zeitzähler für Tarifzwecke. Eine für diesen Zweck entworfene Sonderausführung ihres Zeitzählers als Kontaktapparat, sowie seine Anwendung auf Höchstverbrauchzähler werden in dem folgenden Abschnitt über Tarifsysteme und die dabei benutzten Zähler beschrieben.

B. Sonderkonstruktionen.

a) Elektrizitätsselbstverkäufer.

136. Allgemeines.

Es ist bekannt, welchen Anteil an der stetig zunehmenden Anwendung des Gases für Beleuchtungs- und Heizzwecke die sogenannten Gasautomaten haben. Es sind dies Apparate, welche nach Art der bekannten Verkaufsautomaten gegen ein oder einige Geldstücke ein bestimmtes Quantum von Gas in den betr. Verbrauchsapparat eintreten lassen. Nach vollständigem Verbrauch dieser Gasmenge wird der Zufluß automatisch abgesperrt und kann neue Gaszufuhr nur durch weiteres Einwerfen von Geldstücken er-

folgen. Der Gedanke lag nun nahe, dasselbe Prinzip auch auf den Verkauf von Elektrizität auszudehnen, und ist dies auch bereits seit vielen Jahren von verschiedenen Seiten versucht und ausgeführt worden. Die Vorzüge eines solchen elektrischen Verkaufsapparates sind hauptsächlich in der bequemen Zahlungsmethode begründet. Die betreffende zu verkaufende Energie, ob Gas oder Elektrizität, braucht in keinem Falle billiger berechnet zu werden, im Gegenteil läßt dieser für den Verbraucher angenehmere Zahlungsmodus eher die Möglichkeit offen, einen teureren Preis für die Einheit zu nehmen. Im allgemeinen sind an einen solchen Apparat dieselben Bedingungen hinsichtlich Genauigkeit, Sicherheit des Funktionierens, Stabilität und Billigkeit des Anschaffungspreises zu stellen, wie an einen Elektrizitätszähler. Die Bedingungen hinsichtlich sicheren Arbeitens müssen hierbei in weit höherem Maße erfüllt sein, denn ein solcher Apparat läßt irgendwelche Störungen, die etwa zu einer frühzeitigen Unterbrechung der Energiezufuhr Veranlassung geben, weit eher und in einer für den Konsumenten unangenehmeren Weise erkennen, als ein Zähler, der, weil mit keiner Unterbrechungsvorrichtung ausgerüstet, wohl falsch zeigt, dies aber erst nach einiger Zeit den kontrollierenden Beamten merken läßt, bzw. erst noch später bei abnorm hoher Stromrechnung zu Reklamationen seitens des Konsumenten Veranlassung gibt. Ein Automat läßt jedoch die Störung momentan erkennen, wofern dieselbe den Strom zu früh unterbricht. Diese betreffs der Betriebssicherheit zu fordernde große Zuverlässigkeit dürfte der Hauptgrund dafür sein, daß diese Apparate bisher in Elektrizitätswerken nur in vereinzelten Fällen haben festen Fuß fassen können. Eine weitere Erklärung wird allerdings darin zu suchen sein, daß die Existenz dieser Elektrizitätsautomaten heute in dem großen Publikum noch fast vollkommen unbekannt ist.



Bei diesen Automaten, die wiederum im Endzweck der Gewinnung kleinerer Anschlüsse dienen sollen, kann die Messung nun in zweierlei Weise geschehen. Handelt es sich bei einer solchen kleinen Installation um einen praktisch stets den gleichen Stromkonsum besitzenden Apparat wie einen Ventilator, kleinere Heizvorrichtungen, oder ist durch die Schaltung und damit vorhandene Sicherungen die Entnahme nur einer begrenzten Energiemenge möglich, so genügt es offenbar, für einen eingeworfenen Geldbetrag diese Energie von bestimmter Wattstundenzahl für eine der Geldmenge entsprechende Zeit dem Konsumenten zur Verfügung zu stellen. Diese Stundenautomaten, wie dieselben z. B. von den Siemens-Schückert Werken ausgeführt werden, besitzen daher analog den Zeitzählern keinerlei die Energie messendes Organ, sondern bestehen lediglich aus einer genauen Uhr, welche der eingeworfenen Geldmenge entsprechend den Kontakt für eine bestimmte Zeit herstellt.

Um jedoch eine genauere Kontrolle der verbrauchten Energie zu besitzen, ist es zweckmäßig, die Funktion eines solchen Automaten durch einen Ampere- oder Wattstundenzähler kontrollieren zu lassen. Es entfällt damit vor allen Dingen für den Konsumenten der Ansporn, unter allen Umständen die maximal zulässige Energie andauernd zu verbrauchen. Derselbe kann vielmehr, wenn nötig, statt drei im Maximum angeschlossener Lampen zu bestimmten Zeiten nur eine brennen, was bei einem Stundenautomaten nicht möglich wäre. Die etwas höheren Anschaffungskosten eines solchen aus einem besonderen Elektrizitätszähler und dem eigentlichen Automaten bestehenden Apparates bilden kein ernstliches Hindernis für die Anwendung,

da der bequemere Zahlungsmodus, stets in bar und kleineren Beträgen, es viel eher ermöglicht, von dem Konsumenten durch eine geringe Erhöhung des Grundpreises die Zählermiete und Amortisation des Apparates einzubekommen, als wenn er bei jeder Monatsrechnung einen bestimmten Betrag nur für Zählermiete, d. h. in seinen Augen unnötig, bezahlen muß.

Für die Konstruktion dieser Automaten, die, um dies zu wiederholen, für Erfinder wie Fabrikanten ein fast gleich dankbares Objekt wie der Elektrizitätszähler selbst darstellen, sind bereits die verschiedensten Ideen und Ausführungsmöglichkeiten angegeben und in Versuchsapparaten verkörpert worden. Es ist besonders wieder das elektrolytische Prinzip, in welchem verschiedene findige Köpfe das „Non plus ultra" an Einfachheit für einen Elektrizitätsautomaten gefunden zu haben glaubten. So hat SCHATTNER das von ihm für seine Zähler verwendete Prinzip ebenfalls, und zwar schon vorher, zur Konstruktion eines solchen Automaten verwendet, der in England tatsächlich eine Zeitlang im praktischen Gebrauche stand. Im Prinzip läßt allerdings ein solcher elektrolytischer Apparat eine sehr einfache Konstruktion zu. In Praxis hat sich jedoch bisher das elektrolytische Prinzip ähnlich wie bei dem Zähler nicht als genügend betriebssicher erwiesen, und hat man daher zur Konstruktion eines solchen Automaten wohl oder übel auf rein mechanische Anordnungen übergehen bzw. zurückgreifen müssen, von welchen nachstehend einige deutsche Konstruktionen beschrieben sind.

137. H. Aron El. Z. Fabrik.

Mit unter den ersten erkannte ARON die diesem automatischen Verkaufe innewohnende Bedeutung und konstruierte verschiedene Modelle eines solchen Apparates. Seine neueste Konstruktion eines selbst kassierenden Elektrizitätszählers schließt sich an die von ihm in den letzten Jahren hergestellten Wechsel- und Drehstrom-Motorzähler an, und besteht aus einem solchen Zähler, der mit dem Automatenwerk auf einer gemeinsamen gußeisernen Grundplatte montiert ist, siehe Fig. 157. Es sind jede Art von Kontakten oder Unterbrechungsvorrichtungen vermieden worden, und arbeitet der Zähler rein mechanisch. Soll Strom entnommen werden, so wirft man in die rechts oben an der Vorderseite des Apparates sichtbare Öffnung das oder die betr. Geldstücke hinein, wobei dafür gesorgt ist, daß zu große Münzen nicht durch die Öffnung gehen, kleine dagegen, ohne Elektrizität zu liefern, in die Geldkasette hineinfallen. Es hat also der Stromverbraucher nur durch Benutzung der richtigen Geldsorte die Möglichkeit, Elektrizität zu erhalten. Ist dies geschehen, so ist der aus dem Gehäuse hervortretende Knopf einmal herumzudrehen, und wird hierdurch unter Vermittelung des Geldstückes das Räderwerk des Automaten um einen gewissen Teilbetrag vorwärts getrieben, und gleichzeitig durch eine bei dieser Drehung gespannte Feder ein Stromschalter geschlossen, der die Entnahme der Energie ermöglicht. Das Zähl-

Fig. 157.

werk des Motorzählers ist mit dem Werk des Automaten durch Zwischenräder gekuppelt und treibt nun durch seine eigene bei Stromdurchgang eintretende Rotation das Räderwerk des Automaten um soviel zurück, als es zuvor durch die von Hand erfolgte Drehung des Knopfes vorgestellt wurde. Ist die Anfangsstellung wieder erreicht, d. h. die dem eingeworfenen Gelde entsprechende Strommenge verbraucht, so öffnet sich der Stromschalter selbsttätig und unterbricht die Stromzufuhr. Um nun nicht nötig zu haben, nach einer jeden solchen verhältnismäßig kurzen Periode den Apparat durch Einwurf eines Geldstückes und darauf folgende Drehung des Knopfes wieder betätigen zu müssen, ist die Möglichkeit bei der Konstruktion des Apparates vorgesehen, bis zu 24 Geldstücken der betr. Sorte auf einmal hereinwerfen zu können, d. h. hintereinander und unter Ausführung der Drehung des Knopfes nach jedem Geldstück. Sind die 24 Geldstücke hineingeworfen, so wird der Einwurf selbsttätig gesperrt und erst nach Verbrauch einer e i n e m Geldstück entsprechenden Menge Energie wieder frei gegeben. An der Vorderseite des Automaten ist nun oben ein Zählwerk mit springenden Ziffern angeordnet, welches sich bei Einwurf eines jeden Geldstückes um eine Stelle weiter bewegt und so den fortlaufend in den Apparat geworfenen Geldbetrag direkt erkennen läßt. Ähnlich wie bei einem Zähler muß die Differenz zweier Ablesungen den Geldbetrag ergeben, der sich beim Öffnen in der Kassette vorfindet.

Unterhalb dieses Zählwerkes ist weiterhin ein Zeiger angeordnet, der sich vor einer Kreisteilung bewegt und angibt, für wieviel der eingeworfenen Münzen noch Strom entnommen werden kann. Dieser Zeiger bewegt sich also nach Einwurf einer jeden Münze um einen Teilstrich vorwärts und wird bei Stromverbrauch allmählich durch den Zeiger wieder zurückgetrieben. Es ist dies für den Konsumenten ein bequemes Mittel, sich darüber zu orientieren, für wieviel Geld er noch Strom entnehmen kann.

Das außerdem sichtbare Zifferblatt des Zählers selbst zeigt die tatsächlich verbrauchten Kilowattstunden an. Der von dem Automatenzählwerk während einer gewissen Zeit angegebene Geldbetrag abzüglich des an dem unteren Zeiger ersichtlichen noch unverbrauchten Betrages muß also den von dem Zähler während dieser Zeit angezeigten Kilowattstunden, multipliziert mit dem Einheitspreis, gleich sein.

138. Danubia A.-G.

Auch die D a n u b i a A.-G., S t r a ß b u r g, fabriziert seit längerer Zeit derartige Elektrizitätsautomaten, welche im Anschluß an ihre eigenen Elektrizitätszähler die selbsttätige Abgabe von Elektrizität gegen eingeworfene Geldstücke ermöglichen. Das Funktionieren dieses in Fig. 158 dargestellten Automaten ist ähnlich dem des vorbeschriebenen ARONschen Apparates. Auch hier wird nach Einwurf eines Geldstückes ein Schlüssel in einer Richtung, von links nach rechts, bis zum Anschlage gedreht, und dann in seine Anfangslage zurückgebracht. Hierdurch wird eine für gewöhnlich offene Unterbrechungsvorrichtung geschlossen, welche nunmehr eine der eingeworfenen Geldsorte entsprechende elektrische Energiemenge zu verbrauchen gestattet. Zu diesem Zweck ist der eigentliche Automat mit dem dazu gehörigen Zähler außer durch die Hauptleitung noch durch eine dünne Hilfsleitung verbunden. Ist die Elektrizitätsmenge verbraucht, so erfolgt selbsttätige Öffnung und macht neues Einwerfen von Geldstücken erforderlich. Es können hierbei einzeln bis zu 10 Geldstücke eingeführt werden, wofern der vorher eingeworfene Geldbetrag vollkommen aufgebraucht ist. Der Betrag



139. Siemens-Schuckert Werke.

der noch verfügbaren Geldmenge ist ebenfalls an einer unterhalb des Griffes sichtbar werdenden Zahl von 0 bis 10 abzulesen. die genaue Zahl der eingeworfenen Geldstücke erscheint an dem oberhalb des Griffes befindlichen Zählwerk mit springenden Ziffern.

Die Siemens-Schuckert Werke, G. m. b. H., Berlin, bauen diese Gattung von Elektrizitätsselbstverkäufern als Stunden- und Stromautomaten, beide Male für Gleich- wie Wechselstrom. Der Stundenautomat, in Fig. 159 wiedergegeben, gibt von vornherein festgesetzte Strommengen für bestimmte Zeit ab und besteht im wesentlichen aus einem Schalter, einem genauen Uhrwerk und einer Münzenschaltvorrichtung. Der einpolige Schalter ist je nach der Spannung von 125, bzw. 250 oder 440 Volt für bzw. 20, 10 oder 4 Ampere eingerichtet. Er wird von Hand betätigt, arbeitet als Moment-Ein- und Ausschalter und kann zu beliebiger Zeit geschlossen und geöffnet werden. Das für Handaufzug und 300 bis 350 Stunden Gangdauer bestimmte Uhrwerk besitzt ein in Edelsteinen gelagertes Echappement und ein Zeigerzählwerk

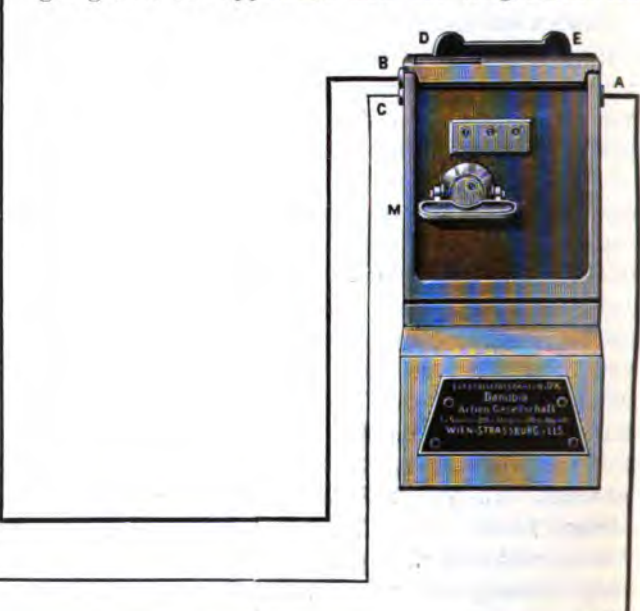


Fig. 158.

mit drei Zeigern. Dementsprechend können an diesem Zählwerk gleichzeitig die Brennstunden abgelesen werden, was wiederum eine Kontrolle für die in dem Automaten enthaltene Geldmenge bildet. Das Uhrwerk läuft an und bleibt so lange in Gang, als der Schalter geschlossen wird und bleibt. Auch hier können in Vorausbezahlung mehrere Münzen hintereinander eingeführt werden, jedoch höchstens soviel, als einer Brenndauer von 45 Stunden gleichkommen. Weitere in irgend welcher Absicht darüber hinaus in den Apparat eingeführte Münzen fallen wirkungslos in die Kassette, ohne jedoch den Apparat beschädigen zu können. Es ist wieder ein Ziffer-



Fig. 159 a.



Fig. 159 b.



Fig. 159 c.

blatt vorgesehen, welches den Betrag der noch unverbrauchten Geldmünzen anzeigt, während wie angegeben die verbrauchte Elektrizitätsmenge bei bekannter Belastung sich an dem Zählerwerk aus den Brennstunden ergibt. Die eingeworfenen Münzen fallen in einen durch Plombe oder Schloß ge-



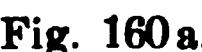
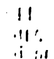


Fig. 160 a.



Fig. 160 b.



schützten Geldkasten, wohin auch sämtliche ungeeigneten oder kleineren Münzen ohne weiteres gelangen. Der Apparat hat keinen Eigenverbrauch, er bedarf keiner Nacheichung und besonderen Wartung. Ausführbar ist er für jede Münzsorte, und kann nach Wunsch die irgend einer Münzsorte entsprechende Stundenzahl bei der Konstruktion des Apparates berücksichtigt werden.

Der Stromautomat, von dem Fig. 160 a und b eine Abbildung in offenem und geschlossenem Zustand geben, wird in zwei Ausführungsformen für Zwei- und Dreileitersysteme hergestellt, und kann nur in Verbindung mit einem vorhandenen Wattstunden- oder Amperestundenzähler in Gleich- und

Wechselstromnetzen Verwendung finden. Er besteht im wesentlichen aus einem Zähler, der Münzenschaltung, und einem Fortschaltrelais. Ein Uhrwerk ist dagegen nicht vorhanden. Der Apparat wird für dieselben Strom- und Spannungsgrenzen wie der Stundenautomat gebaut und verhält sich bezüglich des Schalters, der Wirkungsweise der Münzenschaltvorrichtung, was die Angabe der noch unverbrauchten Anzahl Geldstücke anlangt, genau so wie der Stundenautomat. Seine besondere Wirkungsweise in Verbindung mit dem Zähler ist die folgende. Auf die eine Achse des Zählwerkes im Zähler selbst ist eine Kontaktvorrichtung gesetzt, welche nach Inbetriebsetzen des Zählers durch eingeworfene Geldstücke nach einigen Umdrehungen betätigt wird. Hierdurch wird das Fortschaltrelais im Automaten erregt und stellt den die Zahl der noch unverbrauchten Geldstücke angebenden Zeiger eine kleine Strecke auf Null zurück. Dies wiederholt sich, bis die der gesamten Zahl der eingeworfenen Münzen entsprechende Wattstundenzahl verbraucht ist. Der betr. Zeiger ist alsdann ganz auf Null zurückgeführt und unterbricht den Stromkreis. Eine in der Zwischenzeit in den Apparat neu eingeworfene Münze bringt den Zeiger natürlich wieder um das entsprechende Stück vorwärts. Auch dieser Stromautomat hat keinen Eigenverbrauch und bedarf keiner weiteren Wartung. Diese Wirkungsweise ermöglicht es, den Stromautomaten in Verbindung mit jedem vorhandenen Zähler zu benutzen, was von jedermann ohne irgend welche Fachkenntnis geschehen kann. Es muß nur die Kontaktvorrichtung an dem Zählwerk angebracht und die betr. Leitung angeschlossen werden.

Für den vorbeschriebenen Stundenautomaten wird noch ein besonderes Überlastungsrelais (siehe Fig. 159c) auf Wunsch geliefert, um hierdurch die Möglichkeit auszuschließen, daß der Konsument, ohne an der Schaltung sonst etwas zu ändern, z. B. statt der vorhandenen 16 kerzigen Lampen solche für eine höhere Kerzenzahl einsetzen kann. Die in einem solchen Falle bewirkte Steigerung der Stromstärke bringt das Überlastungsrelais, aus einem Elektromagneten mit durch eine Federkraft bestimmter Stärke beeinflußten Anker bestehend, zum Ansprechen, welches hierdurch den Stundenautomaten ausschaltet. Sobald diese unzulässige Belastung geschwunden ist, arbeitet der Apparat wieder regelrecht. Das Relais wird für jede gewünschte Belastungsgrenze eingestellt und ist ebenfalls für Gleich- und Wechselstrom brauchbar.

b) Bahnzähler.

140. Allgemeines. Außer den bereits im Vorstehenden beschriebenen Ampere- und Wattstundenzählern normaler Ausführung kommen in manchen Fällen für besondere Zwecke noch hiervon mehr oder minder abweichende Konstruktionen zur Verwendung, die sowohl hinsichtlich ihrer mechanischen Ausführung, dann in der elektrischen Schaltung Eigenheiten aufweisen. Es wurde bereits bei der Beschreibung der heute hergestellten Ampere- und Wattstundenzähler verschiedentlich darauf hingewiesen, wie sich die mechanische Konstruktion und die äußere Ausführung der Zähler ändern, je nachdem es sich um einen solchen Apparat für kleine, mittlere oder sehr hohe Stromstärken handelt, oder je nachdem die Netzspannung 110 oder 220 Volt oder 500 bis höchstens 1000 Volt in Gleichstrombetrieben oder darüber hinaus mehrere Tausend Volt in Wechselstromanlagen beträgt.

Als Sonderkonstruktionen sind ferner die für rein transportable Zwecke

hergestellten sogenannten Bahnzähler zu betrachten, da die bisher behandelten Zähler fast ausschließlich nur für stationäre Anordnung, wenigstens während ihres praktischen Gebrauches, bestimmt waren. Ein solcher für Verwendung in elektrischen Wagen bestimmter Zähler muß offenkundig nicht nur denselben Anforderungen, die schlechthin an einen modernen Elektrizitätszähler zu stellen sind, genügen, sondern darüber hinaus namentlich in mechanischer Beziehung außerordentliche Widerstandsfähigkeit aufweisen. In elektrischer Beziehung treten gewisse Forderungen, wie die einer möglichst hohen Anlaufsempfindlichkeit und eines geringen Eigenverbrauches ziemlich in den Hintergrund, da die geringste bei Bahnbetrieb vorkommende Belastung immer noch sehr viel höher liegt als die bei einem stationären Lichtzähler praktisch mögliche oder denkbare Mindestbelastung. Es kann fernerhin der Stromverbrauch ein etwas höherer sein, da den immerhin sehr beträchtlichen Energiemengen gegenüber, die ein elektrischer Motorwagen erfordert, ein oder einige Watt Mehrverbrauch, namentlich bei dem durchgehend niedrigen Preise, der für den zum Betriebe einer elektrischen Bahn erforderlichen Strom gezahlt wird, vollkommen zu vernachlässigen sind. Dagegen muß der Zähler den bei dieser Verwendung unvermeidlichen mechanischen starken Stößen und andauernden Erschütterungen, den Einflüssen von Temperaturschwankungen, Feuchtigkeit und Staub, denen er hier weit mehr ausgesetzt ist als der stationäre Zähler, sich weit widerstandsfähiger erweisen, und ist hierauf bei seiner Konstruktion entsprechende Rücksicht zu nehmen.

Die Benutzung von solchen Bahnzählern geschieht im wesentlichen aus den beiden Gründen, den tatsächlichen und mittleren Stromverbrauch des Wagens unter verschiedenen Betriebsbedingungen genau feststellen zu können, danach, um die Wagenführer kontrollieren und sie durch Aussetzung besonderer Fahrprämien für geringsten Stromverbrauch und Einhaltung der mittleren Geschwindigkeit zu möglichster Ökonomie beim Fahren anzuhalten. Es wurde schon bei den Zeitzählern dieses Momentes Erwähnung getan, wenngleich hierfür aus verschiedenen Gründen, nicht zuletzt auch solchen rein ethischer Natur, der Zeitzähler mitunter dieselben Dienste in billigerer und sicherer Weise zu leisten imstande ist. Sofern es sich natürlich außer dieser zweiten Einwirkung auf die Wagenführer noch um gelegentliche oder periodische Feststellungen des tatsächlichen Energieverbrauches solcher Motorwagen handelt, können für diesen Zweck nur Wattstundenzähler in Betracht kommen. Diesem Bedürfnisse glaubten die verschiedenen Firmen anfänglich einfach dadurch entsprechen zu können, daß sie die normale Ausführung ihrer betr. Wattstundenzähler mit einer besonderen stark federnden und elastischen Aufhängung und Stromzuführuug versahen. Es ergab sich bald, daß dies den weit stärkeren mechanischen Strapazen gegenüber, die der Bahnbetrieb an die Zähler stellt, nicht ausreichte, und da das Bedürfnis nach einem für solche und noch andere transportable Zwecke brauchbaren Zähler nicht nur vorhanden war, sondern allmählich ein größeres wurde, so entschlossen sich einzelne Firmen, hierfür Spezialkonstruktionen auszuarbeiten, von denen nachstehend zwei näher beschrieben sind.


141. Allg. Elektr. Gesellschaft.

So baut die A.E.G. hierfür einen THOMSON-Zähler in besonders kräftiger mechanischer Ausführung, welche in Fig. 161, den Zähler mit abgehobener Kappe darstellend, wiedergegeben ist. Es ist hierbei in einer der Firma gesetzlich geschützten Schaltung parallel zu dem Anker ein Widerstand gelegt, um zu verhüten, daß bei großen Spannungsschwankungen, die im

Straßenbahnbetriebe unvermeidlich auftreten, ja selbst beim Abfliegen der Bürsten vom Kollektor bei heftigen mechanischen Stößen, alsdann an den Bürsten nicht die volle Spannung auftritt, da der Parallelwiderstand des



Fig. 161.



Fig. 162.

Ankers eine volle Unterbrechung des Nebenschlußkreises ausschließt. Die Funkenbildung kann infolge dieser Vorsichtsmaßregel eine gewisse zulässige Grenze selbst unter diesen schwierigen Bedingungen nicht überschreiten. Der im übrigen in Prinzip und Ausführung dem normalen THOMSON-Zähler der Firma sehr ähnliche Zähler wird an der in Fig. 162 dargestellten Aufhängevorrichtung montiert, welche ein in sich verschiebbares und durch mehrere Spiralfedern in sich abgefedertes Rahmenwerk darstellt. Es werden hierdurch Stöße in senkrechter Richtung aufgenommen und dem Zähler gegenüber unschädlich gemacht. Um den Zähler auch gegen seitliche Stöße zu schützen, ist das ganze Gestell in einem Punkte drehbar gelagert. Entsprechend an dem Gestell angebrachte Röllchen ermöglichen es, daß sich dasselbe, obwohl an der Befestigungsplatte anliegend, dennoch seitlich bewegen kann, wobei zu große Schwingungen in dieser seitlichen Richtung durch senkrecht angeordnete Federn begrenzt werden, die den Zähler immer wieder in seine Mittellage zurückführen. Der Zähler wird meistens zwecks bequemer Ablesung und Zugänglichkeit im Inneren der Wagen an einer der Stirnwände oberhalb einer Tür angebracht. Das Zählwerk ist, wie aus der den Zähler in vollständiger Montierung darstellenden Fig. 163 hervorgeht, an das untere Ende der Achse verlegt und für bequeme Ablesung schräg zu der Rückwand des Zählers angeordnet.



Fig. 163.

In ähnlicher Ausführung werden solche Bahnzähler, meistens auf besondere Anfrage, auch von den anderen Firmen geliefert, wobei immer durch Benutzung von Federn, Gummipuffern, für eine möglichst elastische Abfederung des gesamten Zählers Sorge getragen wird.

142. H. Aron El. Z. Fabrik.

Auch ARON ließ in seiner Vielseitigkeit dies Problem nicht unbeachtet und baute, einigermaßen von dem mechanischen Konstruktionsprinzip seiner Zähler abweichend, einen besonderen Bahnzähler mit einer elektrisch beeinflußten Unruhe, wie derselbe bereits bei dem ARONschen Pendelzähler beschrieben ist. Seine äußere Ausführung ist in Fig. 164 wiedergegeben.

c) Akkumulatorenzähler.

143. Allgemeines.

Von den eine wesentlich andere elektrische Schaltung besitzenden Zählern sind die zur Kontrolle der Ladung und Entladung von Akkumulatoren-Batterien bestimmten Zähler hervorzuheben. Von vornherein kann ein jeder Zähler zur Messung der Ladung und Entladung benutzt werden, wenn er zu diesem Zweck mit einer entsprechenden Schaltvorrichtung versehen wird, welche zwischen jeder Ladung und Entladung oder umgekehrt umgestellt wird. Durch regelmäßige Aufzeichnung der genauen Zählerdifferenzen läßt sich ein genaues Bild der eingeladenen und herausgenommenen Strommenge erhalten. Eine solche jedesmalige Umschaltung ist natürlich umständlich und unterbleibt oft bei nicht sorgsamer Bedienung, wodurch dann jede genaue Messung unmöglich wird. Es handelt sich nun offenbar um zwei Aufgaben, denen der Zähler gegebenenfalls gerecht werden soll. Entweder soll ein solcher Apparat den jeweiligen Zustand der Ladung und Entladung der mit ihm verbundenen Akkumulatorenbatterie anzeigen, in welchem Falle ein Vor- und Rücklauf unbedingt zu fordern ist. Es kann sich aber auch darum handeln, daß der Zähler ohne weitere Kontrolle oder Bedienung die während einer bestimmten Periode von mehreren Monaten oder einem Jahr in der einen und anderen Richtung durchgeflossene Elektrizitätsmenge, die Lade- und Entladungsenergie, getrennt anzeigen soll. Für beide Möglichkeiten sind entsprechende Lösungen angegeben, von welchen nachstehend als Beispiel die betr. Ausführungen von ARON, sowie der Danubia A.-G. näher erläutert sind.



Fig. 164.

144. H. Aron El. Z. Fabrik.

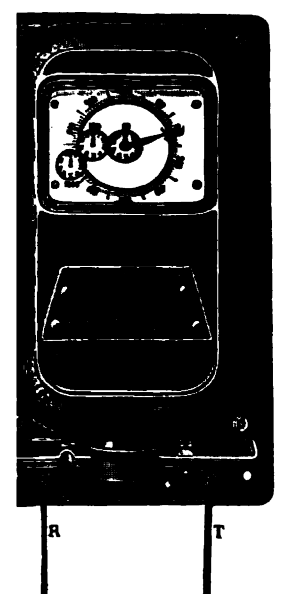
Wie ARON in seinem Vortrage auf der sechsten Jahresversammlung des Verbandes Deutscher Elektrotechniker zu Frankfurt a. M. (s. ETZ. 1898, Heft 33), ausführte, haben sich die für die laufende Kontrolle des Lade- und Entladungszustandes einer Batterie möglichen und auch von ihm selbst und anderen angewendeten elektrolytischen Meßmethoden nicht bewährt. Eine auf rein mechanischem Prinzip beruhende Lösung in praktisch brauchbarerer Form erzielte darauf der englische Ingenieur MILLER, indem er einen älteren ARONschen Pendelzähler, mit langen Pendeln ausgestattet, entsprechend

abänderte. Statt der verschiedenen Zifferblätter zur Ablesung der Kilowattstunden brachte er ein einziges großes Zifferblatt mit einem entsprechenden weithin sichtbaren Zeiger an, welcher während der Ladung der Batterie, die er kontrollieren soll, fast über das ganze Zifferblatt bewegt wird. Geschieht dies bei der Ladung z. B. im Sinne des Uhrzeigers, so wird er bei der Entladung in umgekehrter Richtung zurückgeführt, jedoch nicht vollständig, da meistens selbst bei langsamer Entladung der Nutzeffekt der Batterie in Amperestunden wesentlich unter 100 % liegt, im Mittel ungefähr 90 % beträgt. Der Zeiger muß daher nach jeder Entladung für die neue Ladung zuvor mechanisch auf Null zurückgeführt werden, was praktisch unbequem ist. Unter der Annahme nun, daß der mittlere Nutzeffekt der Batterie in Amperestunden tatsächlich 90 % beträgt, umging Miller diesen Übelstand, indem er dem Zähler durch Kurzschließen eines Teiles des Nebenschlußwiderstandes mittelst einer Kontaktvorrichtung für die Ladung eine um ungefähr 10 % geringere Empfindlichkeit gab, als dieselbe bei der Entladung ist. Ist daher der Zeiger durch die Ladung um einen gewissen Betrag im Sinne des Uhrzeigers vorwärts geschoben worden, so wird die dem Nutzeffekt der Batterie entsprechende geringere Amperestundenzahl, die sich bei der Entladung ergibt, durch die im gleichen Verhältnis größere Empfindlichkeit des Zählers für diese Stromrichtung ausgeglichen und der Zeiger auch durch diese um 10 % niedrigere Amperestundenzahl auf Null zurückgeführt. Unter diesen Verhältnissen ist die jeweilige Stellung des Zeigers tatsächlich ein Maß sowohl der Ladung, wie der Entladung. Namentlich vermag der Maschinenwärter aus der Zeigerstellung sofort zu ersehen, wieviel Energie in der Batterie noch enthalten ist.



Fig. 165.

Aron selbst ließ diese immerhin anfechtbare praktische Voraussetzung, unter der diese Messung einzig und allein richtig ist, fallen und konstruierte einen besonderen Akkumulatorenzähler, welcher automatisch die in der einen und anderen Richtung durchgeflossene Elektrizitätsmenge anzeigt. Zu diesem Zweck versieht er einen seiner neueren Umschaltzähler, von der Hauptwelle des Zeigerwerkes ausgehend, mit einer mechanischen Umschaltvorrichtung. Die Welle steht zu diesem Zweck mit zwei lose auf ihr drehbaren Zahnrädern in Verbindung, von welchen sie in jeder Drehrichtung durch entsprechende Kuppelung immer nur eins mitnehmen kann, während das andere durch eine Schaltklinke an der Umdrehung verhindert ist. Diese beiden Räder sind jedes mit einem getrennten Zählwerk gekuppelt, welches, wie aus Fig. 165 ersichtlich, die Stelle des sonstigen Zählwerkes des gewöhnlichen einfachen Zählers einnimmt. Zu beachten ist hierbei, daß die geringe mechanische, dem beweglichen System des Aron-Zählers innewohnende Trägheit, indem jedes der beiden Pendel während jeder Schwingung einmal die Geschwindigkeit Null annehmen muß, den Zähler auch bei momentaner Strom-



umkehr derselben durch Umschaltung folgen läßt. Dieser Punkt ist von Bedeutung bei Bahnanlagen, bei denen zu der Betriebsmaschine eine Bufferbatterie parallel geschaltet wird, welche den ständigen Belastungsausgleich ausführt. Die hierbei oft in Bruchteilen einer Sekunde auftretenden großen Änderungen, begleitet von einer sofortigen Umkehr der Stromrichtung in der Batterie, können durch diesen Zähler sofort aufgenommen und registriert werden.

Während bei Batterien ohne Zellenschalter oder mit Einfachzellenschalter ein Zweileiterzähler benutzt wird, der vor die Batterie geschaltet wird, verwendet die Firma Aron für Batterien mit Doppelzellenschaltern einen Dreileiterzähler in besonderer Schaltung. Derselbe zeigt sowohl bei reiner Ladung wie Entladung, wie endlich auch bei gemischtem Betrieb die betr. Energiemengen der Ladung wie Entladung an dem richtigen Zifferblatt an. Für Dreileiterbatterien kommen zwei solcher Zähler zur Anwendung.

145 Danubia-A.-G.

Der von der Danubia A.-G., Straßburg, vertriebene Akkumulatorenzähler ist lediglich zur Kontrolle der jedesmaligen Ladung und Entladung bestimmt und besteht gemäß Fig. 166 aus einem O'K-Amperestundenzähler von allgemein der gleichen Konstruktion wie bereits beschrieben, lediglich mit einigen Abweichungen im Zählwerk und einem besonders geschalteten Nebenschlußwiderstand versehen. Der Apparat soll in gleicher Weise wie die vorbeschriebene Millersche Ausführungsform des älteren Aron-Zählers den jeweiligen Stand der Ladung und Entladung der Batterie erkennen lassen. Auch hier ist, wenn auch in abgeänderter Form, das Prinzip benutzt, den Zähler für die Ladung unempfindlicher zu machen, und zwar geschieht dies durch einen regulierbaren Kontakt C, welcher den Ladestrom nur einen kleineren Teil CB des Nebenschlußwiderstandes durchlaufen läßt. Demgemäß wirkt auf den Zählmotor eine geringere Klemmspannung ein, als wenn, wie dies bei der Entladung geschieht, der Strom den gesamten Widerstand durchfließt, und demgemäß die Spannung an seinen Enden eine höhere ist.

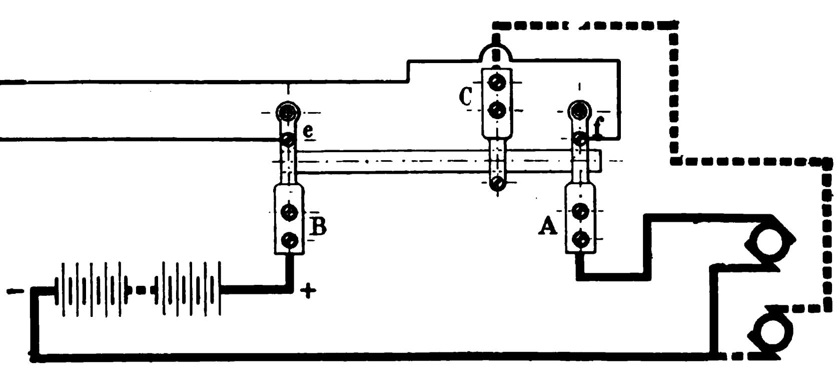


Fig. 166.

Das Verhältnis $CB : BA$ soll hierbei dem Nutzeffekt der Batterie in Amperestunden entsprechen, und ist durch diese Schaltung alsdann der Zähler im gleichen Verhältnis bei der Entladung empfindlicher. An dem Zähler selbst ist an der Stelle des üblichen Zählwerkes mit mehreren Zifferblättern ein großes Zifferblatt mit einem langen Zeiger angebracht, der sich bei der Ladung im entgegengesetzten Sinne des Uhrzeigers dreht. Bei der Entladung tritt eine umgekehrte Drehung des großen Zeigers ein, gleichzeitig registrieren die beiden seitlich von ihm angebrachten kleinen Zifferblätter die verbrauchten Amperestunden.

C. Mehrfachtarifsysteme und ihre Zähler.

Allgemeines.

146. Rentabilitätsbedingungen bei Elektrizitätswerken.

Es ist noch heute als größter praktischer Nachteil des elektrischen Stromes sein zu hoher Preis anzusehen. Die so vielseitig verwendbare elektrische Energie würde für die verschiedensten Anwendungen in weit höherem Maße Benutzung finden, in erster Linie natürlich für Beleuchtungszwecke, dann aber auch für verschiedene gewerbliche Anwendungen, wenn der Preis der dem Abnehmer verkauften Kilowattstunde nicht im Verhältnis zu dem Einheitspreise anderer Energiequellen zu hoch wäre. Die natürliche Folge hiervon ist, daß mit Ausnahme eines geringen Prozentsatzes entweder sehr großer oder allgemein unter besonders vorteilhaften Bedingungen arbeitender Elektrizitätswerke die Mehrzahl derselben keine allzu glänzende Rentabilität besitzt. Es wurde bei der Beschreibung der Elektrizitätszähler bereits des öfteren die Frage gestreift, inwiefern sogar der Preis dieser Meßapparate für die Gesamtkosten von Bedeutung ist. In dem Bestreben, die Rentabilität eines Werkes zu heben, läßt sich offenbar nach zwei Methoden verfahren. Die Erzeugungskosten des elektrischen Stromes und allgemein die Gesamtunkosten des Werkes müssen gering, die Einnahmen nach Möglichkeit vermehrt werden. Nun ist hinsichtlich der Erzeugung der elektrischen Energie auf Grund des reichlich vorliegenden statistischen Materiales aus den vielen Tausenden von elektrischen Zentralen, die bereits mehrere Betriebsjahre aufweisen, nicht wahrscheinlich, daß bezüglich der direkten Erzeugungskosten eine wesentliche Verminderung in dem Durchschnittspreise der Kilowattstunde in der nächsten Zeit eintreten wird. Bei diesen Erzeugungskosten sind nun wohl zu unterscheiden die direkten, welche sich auf die Ausgaben für Kohle, bzw. die anderen Brenn- oder Erzeugungsmaterialien, Öl, Wasser, beschränken und welche ausnahmslos nur einen sehr geringen Bruchteil der gesamten Unkosten ausmachen. Den Rest bilden die indirekten Betriebskosten, welche sich aus Verzinsung des meist nicht unerheblichen Anlagekapitales, der Amortisation von Gebäuden, Maschinen, Kabeln und Anlagen, den Reparaturkosten und schließlich den Gehältern und Löhnen zusammensetzen. Eine kurze Überlegung zeigt, daß hierbei die indirekten oder allgemeinen Unkosten nur unwesentlich von der Belastung der Zentrale abhängen. Die teuren Maschinen, Apparate und Kabel sind vorhanden, erfordern Unterhaltung, Zinsen und Amortisation, gleichgültig oder doch nur wenig davon abhängig, ob die Zentrale schwach oder stark belastet ist. Dagegen sind die direkten Betriebskosten, der gewählten Bezeichnung entsprechend, der Menge der in einem Jahre insgesamt abgegebenen Energie

so gut wie direkt proportional. Da nun die Einnahme des Werkes diesen direkten Unkosten wiederum proportional ist, so wird sich die Rentabilität des Werkes, als das Verhältnis von Gesamteinnahmen- und Ausgaben um so ungünstiger stellen, je kleiner die direkten Unkosten gegenüber den indirekten sind, was leider, wie bemerkt, in den heutigen Zentralen meistens noch zutrifft. Die Rentabilität wird steigen, einen je größeren Anteil die direkten Betriebsunkosten an den Gesamtunkosten des Werkes ausmachen. Es ergibt sich also als Grundbedingung, was von vornherein klar erscheint, den Absatz des Werkes an Elektrizität, d. h. den Umsatz der von ihm verkauften Ware nach Möglichkeit zu erhöhen, um so den Jahresgewinn zu steigern.

Dieser allgemein in jedem kaufmännischen Betriebe gültige Grundsatz bedarf jedoch in diesem Sonderfall der Erzeugung und Verteilung von elektrischer Energie einer wichtigen Einschränkung. Von Anfang an versuchten die Werke, nach Möglichkeit neue und möglichst viele Stromabnehmer zu gewinnen, deren Verbrauch nach einem Tarif während des ganzen Tages gemessen wurde, allerdings durchweg zu verschiedenem Preise der KWSt. für Licht und Kraftzwecke. Nachdem aber auch hierdurch in der Rentabilität des Werkes keine entsprechende Besserung eintrat, diese vielmehr sich in manchen Fällen überhaupt nicht besserte oder, was das Merkwürdigste war, noch verschlechterte, wurde man darauf geführt, den wirtschaftlichen Bedingungen eines solchen Betriebes genauer nachzuforschen und fand hierbei, daß bei einem Elektrizitätswerk allgemein ein möglichst hoher Umsatz durchaus nicht unter allen Umständen wünschenswert und vorteilhaft ist. Es kommt nicht darauf an, daß die Zentrale möglichst hoch belastet ist und viel Energie im Jahre abgibt, sondern vielmehr darauf, wie sie dieselbe abgibt. Das günstigste Resultat erzielt man, wenn die Zentrale vollkommen gleichmäßig belastet ist. Allgemein muß die Anlage, was Grund und Boden, Größe der Baulichkeiten, Stärke und Anzahl der Maschinen und Reserven, Ausdehnung des Kabelnetzes, Anzahl der Arbeiter und Beamten anlangt, der von der Zentrale maximal zu leistenden Energie entsprechen, d. h., wenn die Zentrale zu bestimmten Zeiten des Jahres, und hierbei wieder zu bestimmten Tagesstunden, wie dies praktisch wohl meistens in den Abendstunden vor Weihnachten der Fall ist, den Höchstbetrag an elektrischer Arbeit zu liefern hat, so muß die gesamte Anlage hierfür entworfen sein. Während man im Sommer in den Tagesstunden, namentlich unter Mittag, wo meistens auch die gewerblichen Betriebe ruhen, mit wenigen Prozent der Gesamtkapazität der Zentrale auskommt, müssen sehr viel umfangreichere Maschinenanlagen und größeres Personal vorhanden sein, um dem maximalen Bedarf zu entsprechen. Da nun wie erwähnt die allgemeinen Unkosten, welche sich im wesentlichen aus den Gehältern, Verzinsung, Amortisation und Unterhaltung dieser teuren Apparate und Maschinen zusammensetzen, von der mittleren Belastung fast unabhängig sind, dagegen durch den nur für sehr kurze Zeit bestehenden maximalen Bedarf in dem tatsächlichen Umfange bedingt werden, so wird das Bestreben und Interesse eines jeden Zentralenleiters nicht darauf gerichtet sein müssen, kritiklos seinen Absatz zu erhöhen, sondern die Belastung der Zentrale möglichst auszugleichen, und neue Stromverbraucher nur unter besserer Ausnutzung der vorhandenen Maschinen und Anlagen zu gewinnen.

Wie bekannt, setzte man in dieser Beziehung anfänglich auf die Akkumulatoren große Hoffnung. Diese Aufspeicherungsapparate sollen ja in erster

Linie dem Zwecke dienen, die zur Zeit schwächerer Belastung verfügbare Arbeit der Maschinen in sich aufzunehmen, um dieselbe zur Zeit stärkeren Bedarfes zu derjenigen der Maschinenanlage hinzuzuliefern, um fernerhin zur Zeit sehr schwachen Bedarfes denselben allein decken zu können und alsdann die hierbei nur mit geringem Nutzeffekt arbeitenden Maschinen zeitweise außer Betrieb setzen zu können, und hierdurch an Betriebskosten zu sparen. In Wirklichkeit ist dieses Ziel mittelst des Bleiakkumulators, der einzig und allein in Frage kommt, nur sehr unvollkommen zu erreichen. Eine solche Hilfsbatterie ist, zumal für größere Leistungen, ein sehr kostspieliger Apparat und erfordert sehr sorgsame Bedienung und hohe Amortisations- und Unterhaltungskosten. Sodann ist der Wirkungsgrad in Praxis meistens ein sehr geringer, nicht sehr viel höher wie zwischen 60 bis 70 % liegend. Denn wenn auch prinzipiell namentlich im neuen Zustande einer Batterie bis zu 80 % der eingeladenen Wattstunden bei der Entladung zurückerhalten werden können, so fällt einmal dieser Wirkungsgrad bei andauerndem praktischen Gebrauche schnell herab und ist bei starker Belastung der Batterie ein sehr geringer. Schließlich hat man, wofern die Batterie nicht innerhalb eines oder zweier Tage vollkommen entladen wird, mit einer nicht unbeträchtlichen Selbstentladung zu rechnen. Kann daher auch eine Akkumulatorenbatterie als Zusatzenergiequelle in einer elektrischen Zentrale für den täglichen Belastungsausgleich schätzbare Dienste leisten, wie dies auch in der Tat die hauptsächliche Verwendung der heutigen Bleiakkumulatoren ist, namentlich bei sehr großen Belastungsschwankungen wie bei Bahnbetrieb, so ergibt sich doch aus den vorstehend dargelegten Bedenken, daß dieser Ausgleich einmal technisch, noch mehr aber in wirtschaftlicher Beziehung ein sehr unvollkommener ist. Vor allen Dingen ist eine solche Batterie unfähig, diesen Ausgleich für größere Zeiträume von mehreren Wochen oder Monaten auszuführen.

147. Doppeltarif.

Aus diesem Grunde mußte auf andere Mittel und Wege gesonnen werden, die Gleichmäßigkeit der Belastung, in anderer Ausdrucksweise den Belastungsfaktor, als das Verhältnis der mittleren zur maximalen Belastung, günstiger zu gestalten. Man wird hierbei so verfahren müssen, daß die zu gewinnenden neuen Stromabnehmer die Energie zu d e n Zeiten vorzugsweise beziehen, in welchen die schwächere Belastung der Zentrale sehr viel Energie verfügbar macht o h n e eine wesentliche Erhöhung der indirekten Betriebskosten. Da fast durchgängig die Lichterzeugung den größten Anteil an der Gesamtmenge der produzierten elektrischen Energie besitzt, Licht natürlich von verschwindend kleinen Ausnahmen, wie der Beleuchtung auch am Tage dunkler Räume, abgesehen, nur in den Abend- und Nachtstunden benötigt wird, so wird man in erster Linie die Verwendung der Elektrizität zu gewerblichen Zwecken während der Tagesstunden anzustreben haben. Die Gewinnung solch neuer Abnehmer ist also nur während dieser Zeiten sonstiger schwacher Belastung der Zentrale wünschenswert, hat dagegen kein Interesse für die anderen Stunden stärkerer Belastung, ist sogar in letzterem Falle als direkt schädlich zu verhüten. Denn wenn ein Abnehmer seine Energie z. B. gleichmäßig während der Zeit schwächerer und stärkerer Belastung bezieht, so wird sein Hinzutreten für die Zentrale von keinem Vorteil, eher nachteilig sein. Denn die hierdurch erzielte bessere Ausnutzung des Werkes während der Tagesstunden wird durch die stärkere während der Abendstunden nicht nur ausgeglichen, sondern durch die hierdurch bewirkte Erhöhung der Höchst-

belastung in das Gegenteil verkehrt. Es gibt nun zweifellos kein einfacheres und wirksameres Mittel, die Konsumenten zur Stromentnahme gerade in diesen der Zentrale genehmeren Zeiten zu veranlassen, als daß man ihnen den Strom während dieser Stunden zu einem billigeren Preise oder Tarife anbietet. Dies ist auch ohne besonderes Bedenken für die Zentrale ausführbar, da ja die Mehrerzeugung von Energie in diesen Stunden schwächerer Belastung nur eine geringe Erhöhung der direkten Ausgaben an Öl, Kohlen, Schmiermaterial usw. erfordert. Man kommt so zu dem Mehrfachtarif. Denn wenn es allgemein zweckmäßig ist, die elektrische Energie zu den Tagesstunden billiger abzulassen wie des Abends, so folgt hieraus, daß hierbei in den einzelnen Zentralen, abhängig von der Natur der Betriebskraft, ob Kohle, Wasser oder Gas, ferner abhängig von den besonderen örtlichen Verhältnissen, was Klima, Industrie und dgl. anlangt, hierbei besondere Verhältnisse obwalten und berücksichtigt werden müssen. Man wird so in vielen Fällen nicht nur einen zweifachen, sondern einen mehrfachen Tarif als besonders zweckmäßig herausfinden, wenn seine praktische Durchführung nicht allzu große Komplikationen in der Messung und Berechnung der elektrischen Energie im Gefolge hat. In Wirklichkeit hat man allmählich die komplizierteren Mehrfachtarif-Systeme in den meisten Fällen wieder verlassen und ist zu dem nach vieler Meinung praktisch den günstigsten Kompromiß darstellenden Doppeltarif über- bzw. zurückgegangen. Durch diesen Tarif wird also der Einheitspreis der elektrischen Energie für bestimmte Tagesstunden, die bei jeder Zentrale verschiedene sein, sogar in derselben Zentrale von Zeit zu Zeit geändert werden können, wesentlich herabgesetzt, um die Konsumenten zu veranlassen, vorzugsweise während dieser Stunden ihren Bedarf zu decken, oder neue Konsumenten anzuwerben, deren Beruf oder gewerbliche Tätigkeit die Benutzung des Netzes während dieser Stunden ohne weiteres ermöglicht.

Es ist hierbei auch der weiteren Möglichkeit zu gedenken, die viele Zentralen größeren Abnehmern bieten, daß sie von der Entnahme einer Mindestzahl von Kilowattstunden ab diesen Abnehmern die Aufstellung einer Batterie gestatten, die zur Zeit dieses niedrigeren Tarifes geladen werden kann und denselben alsdann das Licht für die Abend- und Nachtstunden liefert. Es ist klar, daß hierfür nur größere Stromverbraucher in Frage kommen können, bei denen sich bei der Höhe der Monatsrechnung die Aufstellung einer besonderen Batterie empfiehlt. Denn außer den Anschaffungs- und Unterhaltungskosten ist hierbei der Nutzeffekt der Batterie zu berücksichtigen, und muß daher die gesamte Entnahme der Elektrizität und der betr. niedrigere Tarif so bemessen sein, daß sich hierbei für den Abnehmer noch ein Vorteil ergibt. Die Zentrale hat ohne weiteres den Vorteil, durch dieses Mittel der Aufspeicherung bei dem Konsumenten die betr. unerwünschte starke Abendbelastung in einfacher Weise auf die Tagesstunden verschieben zu können. Für kleinere Anschlüsse überwiegt die Komplikation und der Anschaffungspreis einer solchen Batterie bei weitem die Vorteile des direkten Anschlusses an die Zentrale zu höherem Preise. Es sind daher überwiegend motorische Anschlüsse, welche eine mit Doppeltarif arbeitende Zentrale auf diese Weise zu gewinnen suchen muß.

Es sind für diesen Zweck besondere Zähler erforderlich, bei welchen die durch einen Zähler irgendwelcher Art gemessene Energie zu den verschiedenen Zeiten nach verschiedenem Tarif registriert wird. Zu diesem

Zweck kann man sich offenbar in einfachster Weise zweier verschiedener gewöhnlicher Ampere- oder Wattstundenzähler bedienen, welche mit verschiedenen Übersetzungsverhältnissen ausgestattet sind und von denen immer nur einer, dem zu den betr. Tageszeiten herrschenden Tarife entsprechend, eingeschaltet ist. Tatsächlich ist dies Mittel verschiedentlich angewendet worden, um die bei einem Werk vorhandenen Einfachtarifzähler mit verwenden zu können. Voraussetzung ist hierbei, daß der außerdem notwendig werdende zweite Einfachtarif-Zähler samt dem nötigen Umschaltmechanismus nicht teurer ausfällt wie ein Doppeltarifzähler. Für die Umschaltung selbst, die zu einem bestimmten Zeitpunkt für alle Zähler zu erfolgen hat, hat man die Verwendung besonderer Umschaltuhren- oder Mechanismen dadurch zu vermeiden gesucht, daß man von der Zentrale selbst aus durch das vorhandene Kabelnetz auf die Zähler in bestimmter Weise einzuwirken versuchte, wie z. B. durch eine nur einen Augenblick dauernde Spannungserniedrigung, um hierdurch ein bestimmtes Relais zum Ansprechen zu bringen. Diese und andere ähnliche Vorschläge sind jedoch in dem Stadium der Möglichkeiten geblieben, und verwendet man heute für die Umschaltung ausnahmslos besondere Umschaltuhren. Dieselben können elektrisch und mechanisch betrieben werden und können die Umschaltung selbst ebenfalls mechanisch oder elektrisch ausführen. Während verschiedene Firmen dem rein mechanischen Betriebe aus Gründen der Einfachheit und Sicherheit den Vorzug geben, verwenden wieder andere elektrischen Betrieb und Betätigung, da hierdurch meistens ein sehr naher Zusammenbau von Uhr und Zähler entbehrlich wird.

Was die Zähler selbst anlangt, so benutzt man heute ausnahmslos nur hierfür direkt entworfene Doppeltarifzähler. Es sind dies Ampere- oder Wattstundenzähler der gewöhnlichen im Vorstehenden beschriebenen Typen, bei welchen die Hauptzählwerksachse nicht direkt auf das oder die Zählwerke einwirkt, sondern mechanisch oder durch elektrische Betätigung mittelst geeigneter Zwischenräder bei dem Übergange vom hohen zum niedrigen Tarif von dem einen auf das andere Zählwerk und umgekehrt übergeschaltet wird. Es sind im Nachstehenden einige hierfür typische neuere Konstruktionen beschrieben worden.

148. Maximaltarif. Es ist jedoch nicht zu verkennen, daß die ohnehin schon schwierige Zählerfrage durch die Einführung des Doppeltarifes sich noch mehr kompliziert hat, indem in erster Linie die Anschaffungskosten der Zähler um mehr als das Doppelte gewachsen sind. Daß darüber hinaus die Sicherheit der Messung und Ablesung nicht wächst, indem noch ein besonderes Uhrwerk und mechanische oder elektrische Schaltvorrichtungen hinzukommen, liegt auf der Hand. Somit verbietet sich die Anwendung dieser teuren und komplizierten Apparate meistens für kleinere Zentralen. Auch bezüglich der größeren Zentralen ist die Ansicht der maßgebenden Personen, als welche die Zentralenleiter einerseits und die Zählerfabrikanten andererseits zu betrachten sind, über den Punkt durchaus noch nicht übereinstimmend, ob der Doppel- oder Mehrfach-Tarifzähler schon das letzte Wort in dieser wichtigen Tariffrage darstellt. Dies wird von mehreren Seiten sogar stark bezweifelt. Wohl stellt das Mehrfachtarifsystem einen zweifellosen Fortschritt dar, indem hierdurch das Hinzukommen neuer Anschlüsse von vornherein in die für die Zentrale nützliche Richtung gelenkt wird. Darüber hinaus trägt aber auch das Doppel- oder Mehrfachtarifsystem den für die Rentabilität eines Werkes ausschlaggebenden Faktoren und Beziehungen nur sehr unvollkommen

Rechnung. Das am Eingang dieser Betrachtungen bereits kurz gestreifte Verhältnis zwischen den direkten Betriebskosten und den indirekten oder allgemeinen Unkosten besitzt noch eine größere Bedeutung als bisher berücksichtigt wurde. Es hat hierfür namentlich WRIGHT, dessen elektrolytischer Zähler bereits beschrieben wurde, eingehende Studien und Berechnungen angestellt und ist zu dem Resultat gekommen, welches heute übrigens mehr und mehr allgemeine Anerkennung findet, wenigstens theoretisch, daß für die Zentrale ausschlaggebend nicht so sehr der Zeitpunkt ist, zu welchem ein Stromabnehmer von der Zentrale vorzugsweise seine Energie bezieht, als vielmehr das Verhältnis der mittleren Benutzung seines Anschlusses zu dem jeweiligen maximalen. WRIGHT findet, daß diese maximale Inanspruchnahme der Zentrale letztere am teuersten zu stehen kommt, indem hierdurch die für die ständige Inbereitstellung der elektrischen Energie aufzuwendenden Kosten bedeutend anwachsen. Er folgert hieraus, daß ein jeder Konsument, da ja die Gesamtheit der Abonnenten ein gleiches gemeinsames Interesse an einer günstigen Rentabilität der betr. Zentrale hat, da es hierdurch in erster Linie möglich wird, eine allen zugute kommende Herabsetzung des Einheitspreises eintreten zu lassen, billigerweise gemäß seinem maximalen Verbrauch zu diesen wesentlichen Kosten der Inbereitstellung der Energie in erster Linie beizutragen hat. Ist dies in angemessener Weise geschehen, so kann er die darüber hinaus von ihm gebrauchte elektrische Energie zu einem weit billigeren Preise beziehen. Der leitende Gedanke ist hierbei also, die wesentlichen indirekten und durch die maximale Leistung der Zentrale bedingten Generalunkosten, welche also durch ihre maximale Inanspruchnahme seitens der einzelnen Konsumenten bedingt werden, proportional diesem Betrage durch die einzelnen Abnehmer in erster Linie decken zu lassen. Darüber hinaus kann dann jeder Stromverbraucher, nachdem er zu diesem wesentlichen Posten der Unkosten beigetragen hat, die weitere Energie zu dem sehr viel geringeren Preise beziehen, wie sich derselbe aus den direkten Betriebskosten ergibt. Zu diesem Zweck wird es nötig sein, außer der gesamten von einem Konsumenten verbrauchten Energie noch durch einen besonderen Apparat in bestimmten Zwischenräumen die von ihm maximal entnommene Energie bestimmen zu lassen. Es muß also außer dem gewöhnlichen Zähler, Ampere- oder Wattstundenzähler, noch ein Maximalzeiger vorgesehen werden, der, wie sich aus der folgenden Beschreibung ergibt, in vielen Fällen, namentlich in der von WRIGHT angegebenen einfachen Form, sich sehr billig, billiger besonders wie der Doppeltarifzähler stellt. Es wird nun in den verschiedenen Zentralen durch besondere Abmachung mit den Konsumenten die in einem bestimmten Zeitraum vorhanden gewesene und von dem Maximalanzeiger angegebene Maximalbelastung für eine bestimmte Anzahl von Stunden als tatsächlich vorhanden betrachtet, und diese so berechnete Maximalbelastung des Werkes zu einem verhältnismäßig hohen Preis der KWSt. berechnet. Die so erhaltenen Kilowattstunden werden von den von dem Zähler gemessenen abgezogen und der Rest braucht nur mit einem sehr viel geringeren Preise pro KWSt. bezahlt zu werden. Wenn auch der von WRIGHT selbst hierfür angegebene und im Folgenden beschriebene WRIGHTsche Maximalzeiger sich außer in England und Amerika, wie der WRIGHTsche elektrolytische Zähler selbst, anderswo nur in einzelnen Fällen hat einbürgern können, so dringt doch das WRIGHTsche Maximalsystem, weil von allgemein billigen und zutreffenden

Erwägungen ausgehend, und mit verhältnismäßig einfachen Apparaten praktisch durchführbar, mehr und mehr in Praxis ein. Die deutschen Firmen stellen zu diesem Zweck rein mechanische Maximalzeiger her, die in vielen Fällen mit den Zählern direkt verbunden werden.

149. Mehrfachtarifsysteme.

Die diesen beiden Hauptsystemen für die Berechnung elektrischer Energie, dem Doppeltarif und Maximaltarif innewohnenden Schwächen haben bei dem großen Interesse, das alle Zentralen an diesem Gegenstande haben, eine Reihe von anderen Vorschlägen und Tarifsystemen gezeitigt, welche nicht nur die angegebenen Nachteile vermeiden, sondern den Elektrizitätswerken neue, ihre Rentabilität steigernde Abnehmer und Absatzgebiete erschließen sollen. Man wirft dem Maximaltarif, und nicht mit Unrecht, vor, daß der Grundgedanke, den auf jeden Teilnehmer entfallenden Anteil der hauptsächlichen Bereitstellungskosten durch einen periodisch arbeitenden Maximalzeiger bestimmen zu lassen, dadurch willkürlich ist, daß diese Maximalbeanspruchung der Zentrale seitens der einzelnen Konsumenten nur dann dazu berechtigt, den betr. Teilnehmer auf Grund seines Maximalverbrauches eine bestimmte Anzahl von Kilowattstunden zu einem sehr hohen Preise bezahlen zu lassen, wenn die maximale Beanspruchung tatsächlich auch zu jenen Zeiten stattgefunden hat, in welchen die Zentrale allgemein den meisten Strom liefern muß, d. h. also in den Abendstunden. Findet das Maximum des Stromverbrauches seitens eines Abonnenten z. B. bei vorzugsweise während des Tages arbeitenden Krahnmotoren statt, so kann der betr. Abonnent demgemäß sogar einen billigeren Preis, namentlich auf Grund des Doppeltarifes, für die Berechnung dieser Energie verlangen.

Dieser Schwäche des Maximaltarifes entsprechen andere dem Doppeltarif anhaftende. Es ist zunächst der Tarifsprung beim Übergang vom niedrigen zum hohen Tarif, der von vielen Abnehmern sehr unangenehm empfunden wird und in der angeführten krassen Weise in den meisten Fällen nicht berechtigt ist, indem sich die Gebrauchszeiten eines solchen Abonnenten mit denjenigen, für die der Doppeltarif in der Hauptsache bestimmt ist, nicht vollkommen decken. Weiterhin ist das Inkraftbleiben des hohen Lichtpreises nach Schluß der Geschäfte, sowie in größeren Städten auch nach dem der hauptsächlichen Lokale, Straßenbeleuchtung etc., sachlich nicht gerechtfertigt, denn von wenigen eigentlichen Nachtlokalen abgesehen tritt nach der scharfen Anspannung der Zentrale in den Stunden des Abends für die Nacht ein starker Abfall ein, und hier könnte mit demselben Recht die Energie zu einem weit geringeren Preise abgegeben werden, genau wie am Tage.

Die Verhältnisse verschieben sich weiterhin in den einzelnen Jahreszeiten, und geht aus alledem hervor, daß, je einfacher der Tarif ist, er sich um so weniger den vielen Erfordernissen des praktischen Lebens anzupassen vermag. Es folgt aber auch weiterhin, daß, wenn man letzterer Bedingung weitgehend entsprechen will, man zu sehr komplizierten Tarif-Messungs- und Berechnungssystemen und Apparaten gelangt. Einmal wird beim Publikum ein derart komplizierter Tarif, der in seinen Grundzügen und seiner praktischen Berechnung nur den wenigsten klar ist, immer mit starkem Mißtrauen betrachtet werden. Die zu seiner praktischen Ausführung weiterhin erforderlichen Hilfsapparate und komplizierten Mechanismen sind ebenfalls im gleichen Maße in der Anschaffung teurer, im Betriebe unsicherer und kostspieliger. Für die Anwendung eines solchen Mehrfachtarifsystemes ist es daher geradezu ausschlaggebend, ob dasselbe sich mittelst eines einfachen,

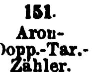
billigen und sicheren Apparates praktisch verwirklichen läßt. Dieses Moment dürfte z. B. für die große Verbreitung des WRIGHTschen Höchstverbrauchsystemes nicht geringe Dienste geleistet haben.

Es seien als Beispiel eines solchen mehrfach abgestuften Tarifes die Bestrebungen von ADRIAN BAUMANN, Zürich, erwähnt, der zu diesem Zweck einen besonderen Preiszähler konstruiert hat, der im wesentlichen ein erweiterter Doppeltarifzähler ist, bei dem jedoch Elektrizitätszähler und Uhr zu einem einzigen Apparat kombiniert sind, und der trotz verschiedener Berechnung des Stromes für die einzelnen Tageszeiten immer die Endsumme direkt in der Geldsorte des betr. Landes anzeigt, was für seine leichte Einführbarkeit beim Publikum von nicht zu unterschätzender Bedeutung ist. BAUMANN will durch dieses Preiszählersystem namentlich bei mit Wasserkraft arbeitenden Zentralen, dann aber auch bei irgend welchen anderen großen Betrieben durch den vielfach abgestuften Tarif einmal die berechtigten Interessen der Zentrale genügend wahren, dann aber auch dem Publikum die Vorteile des elektrischen Stromes für die verschiedenartigste Anwendung, Licht, motorische und Heizzwecke zugänglich machen, wobei namentlich in den Zeiten sehr schwacher Belastung der Zentrale, wie am Tage oder während der Schlafenszeit, der den heutigen Verhältnissen entgegen beträchtlich reduzierte Einheitspreis die Verwendung des elektrischen Stromes selbst für Koch- und Heizzwecke mit Gas konkurrenzfähig, für andauernde Nachtbeleuchtung billiger wie Kerzenlicht machen soll.

150. Spitzenzähler.

Neuerdings machen sich verschiedene Bestrebungen geltend, den in seiner Einfachheit ja idealen Pauschaltarif dadurch den Erfordernissen der heutigen Praxis anzupassen, daß man das ernsteste Bedenken dieses Pauschaltarifes, die Überschreitung des dem betr. Abonnenten zugestandenen Maximalverbrauches, nicht durch irgend welche Unterbrechungsvorrichtungen verhindert oder sonst unter Strafe stellt, sondern daß man diesen Verbrauch einfach registriert. Es sollen also, wenn man den Pauschaltarif in der Belastungskurve des betr. Abonnenten als eine Grade parallel zur Abszissenachse darstellt, die diese Grade überschreitenden Belastungsspitzen registriert werden, woher sich für diese Art Messung und Apparate der Name „Spitzenzähler“ eingebürgert hat. Zu diesem Zweck werden Zähler notwendig, welche bis zu jener Pauschalgrenze nicht registrieren, also stehen bleiben, nach Überschreitung dieser maximalen Belastung jedoch die überschießende Energieentnahme registrieren. Als Vertreter solcher Spitzenzählerkonstruktionen sind im folgenden diejenige der Firma ARON, sowie des Schiersteiner Metallwerkes G. m. b. H., angeführt.

Praktische Ausführungsformen.


151. Aron-Dopp.-Tar.-Zähler.

Der von ARON konstruierte Doppeltarifzähler, von dem Fig. 167 schematisch die Wirkungsweise, Fig. 168 seine heutige praktische Ausführung erkennen läßt, besteht aus einem seiner gewöhnlichen Umschaltzähler für Gleich-, Wechsel- oder Drehstrom und einer in gemeinsamem Gehäuse befindlichen Umschaltpendeluhr. Letztere wird ebenso wie der Zähler selbst elektromagnetisch von der Spannung aus angetrieben, die Umschaltung des Zählers von niedrigem zu hohem Tarif erfolgt dagegen rein mechanisch durch die Uhr. Der auf die Welle c der Umschaltuhr, s. Fig. 167, einwirkende Antrieb treibt das Stundenrad d an, welches weiterhin durch Ver-

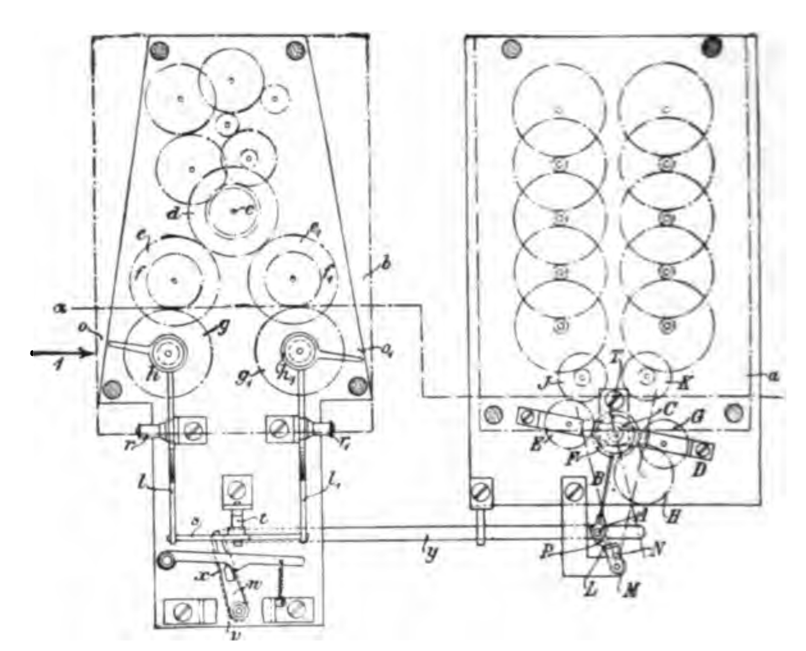


Fig. 167.

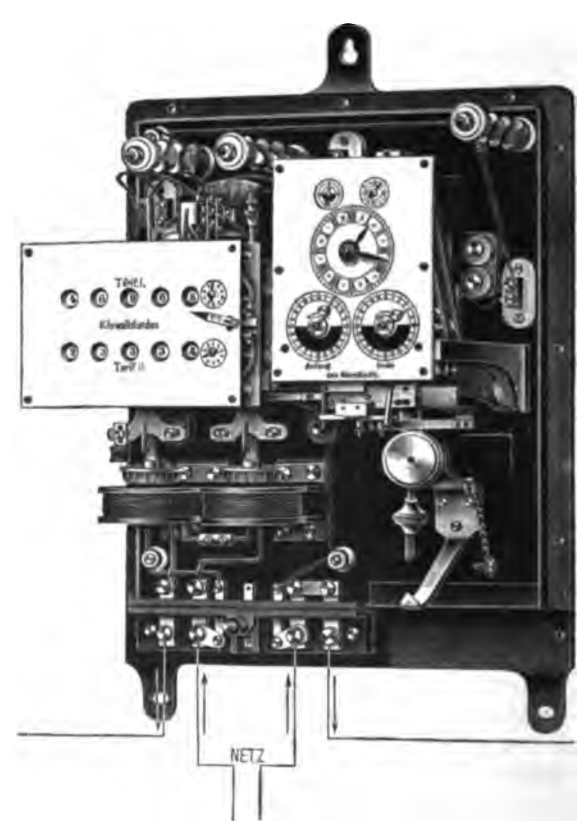


Fig. 168.

mittelung der Zwischenräder ee_1 ff_1 auf die Räder gg_1 derart einwirkt, daß sich diese nur halb so schnell wie das Stundenrad drehen, also in 24 Stunden nur eine Umdrehung machen. Diese beiden Räder gg_1 sitzen auf den in der Werkplatte fest eingeschraubten Stiften hh_1, auf welchen weiterhin die Stellzeiger oo_1 mit Reibung drehbar sind. In diesen Stellzeigern oo_1 wird, wie aus Fig. 168 ersichtlich ist, die Zeit des hohen und niederen Tarifes eingestellt, und zwar an dem linken Zeiger die Anfangszeit, an dem rechten das Ende des Abend- oder höheren Tarifes. Die auf den Stiften hh_1 angeordneten Räder gg_1 tragen nun je einen Butzen, der mit bestimmten Nuten und Aussparungen versehen ist, während die Stellzeiger mit je einer jenen Aussparungen entsprechenden Nase versehen sind. Die Räder gg_1 mit ihren Butzen werden durch Federn andauernd gegen die Nasen der Stellzeiger gedrückt. Die beiderseitige Stellung dieser Einschnitte und Vorsprünge oder Nasen wird so bemessen, daß zu der durch die Stellung der beiden Stellzeiger oo_1 bestimmten Tageszeit eine Verschiebung der Räder gg_1 und damit ein Eindringen der Nasen der Stellzeiger in die Aussparungen der Butzen der beiden Räder gg_1 erfolgt. Dies bewirkt durch verschiedene Winkelübertragung eine Verschiebung des Stellwerkes ll_1 und der damit verbundenen und um den Stift t drehbaren Hebelverbindung s, und zwar bei Anfang des hohen Tarifes in entgegengesetzter Richtung wie zu Ende desselben. Diese Bewegung wird durch die Verbindungsstange y auf den Zähler übertragen, und zwar wird hierdurch die um den Punkt C drehbare Wippe in eine ihrer beiden Endstellungen gebracht. Diese Wippe trägt in der Mitte das vom Zähler direkt angetriebene Rad F, welches durch die beiden Eingriffsräder E und G seine Bewegung auf die beiden Zählwerke für hohen und niederen Tarif überträgt. Je nach der Stellung des Stellwerkes ll_1-s wird durch die Verbindungsstange y und die Wippe der Zähler auf hohen und niederen Tarif umgeschaltet. Die Bewegung der Verbindungsstange y dreht außerdem jedesmal bei der Umschaltung noch einen Zeiger, welcher hierdurch von außen sofort den jeweils eingeschalteten Tarif erkennen läßt. Wie aus Fig. 168 hervorgeht, ist die mechanische Konstruktion dieser in Fig. 167 schematisch dargestellten ursprünglichen Anordnung etwas abgeändert. Statt der vertikal angeordneten Zählwerke werden dieselben neuerdings horizontal und mit direkt ablesbaren Zahlenscheiben ausgeführt. Die beiden Zifferblätter für die Stellzeiger sind zur Hälfte schwarz und weiß ausgeführt, um den Tages- und Nachttarif leicht voneinander unterscheiden zu können.

153. Aron-Max.-Tar.-Zähler. Für die Bestimmung des Höchstverbrauches in elektrischen Anlagen rüstet die Firma Aron auf Wunsch ihre Zähler mit einem rein mechanisch arbeitenden Höchstverbrauchsanzeiger aus, der in Fig. 169 schematisch wiedergegeben ist. Während für diesen Zweck bei anderen Konstruktionen, bei denen der Höchstverbrauchsanzeiger von dem Zählwerk des Zählers selbst angetrieben wird, die Installation eines besonderen Uhrwerkes Bedingung ist, durch welches der Höchstverbrauchsanzeiger vom Zählwerk des Zählers innerhalb gleicher Zeiträume getrennt wird, ist ein solches zusätzliches Uhrwerk bei der Aronschen Ausführung entbehrlich, was einen wesentlichen Vorteil darstellt. Die innerhalb gleicher Zeiträume stattfindende Trennung des Höchstverbrauchsanzeigers vom Zählwerk erfolgt durch eine vom Zählerantrieb direkt betätigte Umschaltvorrichtung. Es erfolgt also die Messung des Höchstverbrauches sowie der gesamten verbrauchten Energie mittelst ein und desselben Apparates. Die Einrichtung ist hierbei die folgende: Das

von dem Zähler direkt angetriebene, der kleinsten Einheit entsprechende Rad *a* spannt mittelst geeigneter Übersetzungsräder die Spiralfeder *b* des Höchstverbrauchsanzeigers *c*. Dieser wird während der Anspannung durch den Anschlag *d* mitgenommen, welcher auf der Nabe des Rades *e*, die auch mit dem einen Ende der Feder *b* fest verbunden ist, angebracht ist. Zweck der Einrichtung ist, daß der Zeiger *c* nur dann von dem Arm *d* mitgenommen und weiter geschoben wird, falls der Verbrauch zunimmt. Der Zeiger *c* soll dagegen in seiner betreffenden Stellung bleiben, falls der Verbrauch der gleiche bleibt oder abnimmt. Zu diesem Zweck wird durch eine mechanische Umschaltvorrichtung in der durch Patent 77 225 geschützten Art in bestimmten gleichen Zeiträumen die Feder *b* entspannt und das Rad *e*, welches lose auf der Welle *f* sitzt, in seine Anfangsstellung zurückgeführt, und damit auch der Arm *d*. Diese mechanische Umschaltung erfolgt durch einen Hebel *k*, der mit dem Hebel *l* ein Ganzes bildet und um die Welle *m* drehbar ist. Der Arm *l* trägt nun das Triebrad *n*, welches die Bewegung des Rades *e* mittelst verschiedener weiterer Übertragungsräder von dem Rade *a* aus vermittelt. Der Anker *k* steht weiterhin unter dem Einfluß einer Feder *o*, und mittelst einer Nase *p* mit in entsprechender Anzahl vorhandenen Stiften *q* in Verbindung, die sich auf einem Rade *r* befinden. Dieses Rad *r* nun, und hierin liegt die Vereinfachung, erhält seinen gleichmäßigen Antrieb von dem Uhrwerk *s* des Zählers selbst. Es wird also der bei dem Aron-Umschaltzähler vorhandene gleichmäßige Antrieb des selbsttätigen Aufzuges mit zur Messung des Höchstverbrauches benutzt.

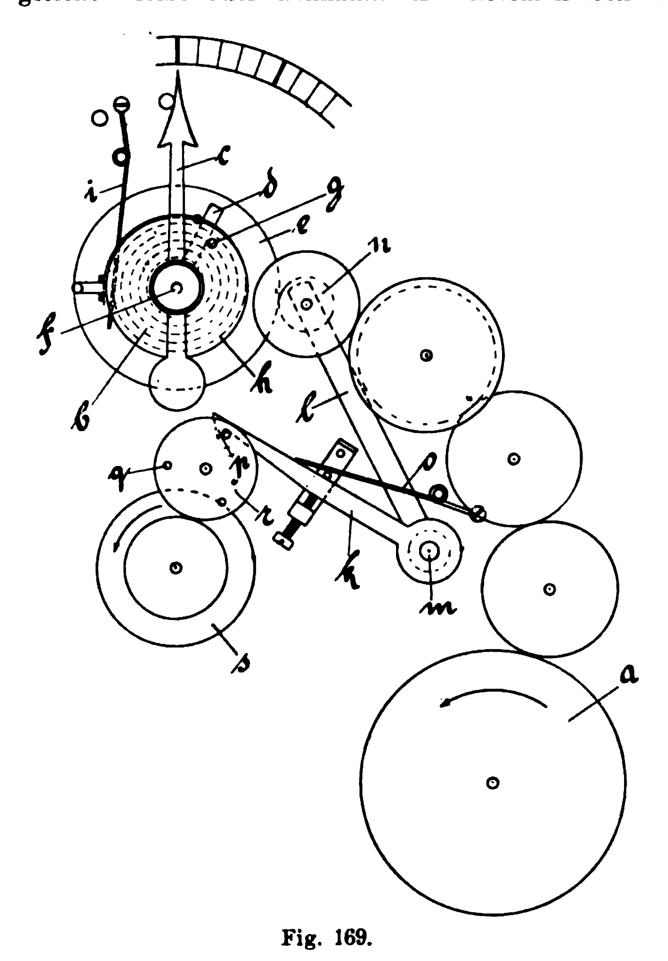


Fig. 169.

Das Uhrwerk *s* löst daher unter Vermittelung der Stifte *q* zu bestimmten Perioden den Arm *k* aus, wodurch plötzlich das Rad *e* mit dem Arm *d* unter dem Einfluß der angespannten Spiralfeder *b* in die Anfangsstellung zurückschnellt. Der Arm *d* kann daher nach erfolgter Auslösung den Zeiger *c* erst dann mitnehmen, bzw. weiter schieben, wenn des Zählwerk in der nächsten

Periode schneller läuft, d. h. wenn der Verbrauch ein größerer geworden ist. In diesem Falle kommt der Arm *d* mit dem Stift *g* in Berührung und nimmt den Zeiger *c* noch weiter mit bis zur nächsten Entspannung der Feder *b*, da Stift *g* auf einer Scheibe *h* sitzt, welche wiederum mit dem Zeiger *c* auf derselben Welle *f* fest angeordnet ist. Eine Sperrvorrichtung *i*, nur nach einer Richtung wirksam, bezweckt, daß der Zeiger in der Stellung verharrt, welche dem Höchstverbrauch entspricht, der in einer gerade abgelaufenen Periode eingetreten ist. Die Zurückführung von Zeiger *c* in die Anfangsstellung erfolgt nach Ablesung des Höchstverbrauches durch den betr. Beamten von Hand aus durch eine Drehung an dem auf der Achse *f* des Zeigers *c* befestigten Knopf. Die Skala, über die sich Zeiger *c* bewegt, ist in Kilowatt eingeteilt und oberhalb des den gesamten Verbrauch in Kilowattstunden angebenden Hauptzählwerkes angeordnet.

153. Aron-Spitzen-Zähler.

Die Firma Aron führt weiterhin besondere Spitzenzähler aus, welche im übrigen ihren normalen Umschaltzählern vollkommen gleichen, deren Pendel jedoch nach oben verlängert sind und daselbst Gegenspulen tragen. Diese Gegenspulen sind der Wirkung fester Gegenrollen in ähnlicher Weise ausgesetzt wie die festen Starkstromspulen auf die Spannungsrollen des Zählers einwirken. Es liegen nun sowohl Gegenspulen wie Gegenrollen an Spannung an, und üben diese beiden Spulenpaare ein konstantes rückwirkendes Moment auf den Zähler aus, dem man durch eine ähnliche Sperrvorrichtung entgegenwirkt, wie dieselbe in den neueren Zählern zur Verhütung des Leerlaufes in Verbindung mit der kleinen zwischen Strom- und Spannungsspulen angebrachten Hilfsspule angebracht ist. Das Zählwerk bleibt also unter Einwirkung dieser Gegenspulen und -Rollen so lange gesperrt, bis der durch die Starkstromspulen des Zählers fließende Strom mit seiner Wirkung auf die Spannungsspulen den Einfluß der Gegenpendel und Gegenspulen überwindet. Auf diese Weise zeigt der Zähler erst denjenigen Verbrauch an, der über einer gewissen Kilowattzahl liegt, aber auch dann nur den überschießenden Betrag, die über der Pauschalgrenze liegende „Spitze". Die Einstellung auf eine bestimmte Pauschalgrenze erfolgt durch Vor- und Abschalten von Widerstand an den festen Gegenrollen. Durch Unterteilung dieses Widerstandes kann der Zähler auch für mehrere Pauschalgrenzen eingerichtet werden.

Diese verschiedenen Doppeltarif-, Höchstverbrauch- und Spitzenzähler-Konstruktionen der Firma Aron können weiterhin miteinander kombiniert werden zu ihrer Benutzung für bestimmte Sondertarifsysteme. So kann z. B. ein Doppeltarifzähler mit Höchstverbrauchanzeiger kombiniert werden, da es in bestimmten Fällen von Interesse sein kann, bei Anlagen mit Registrierung nach dem Doppeltarif außerdem noch den Höchstverbrauch kennen zu lernen. Zu diesem Zweck können an dem Aronschen Doppeltarifzählern Höchstverbrauchanzeiger angebracht werden und zwar nach Wahl unter Kuppelung des Höchstverbrauchanzeigers mit dem Zähler nur während des hohen Tarifes, so daß also nur der während der Sperrzeit auftretende Höchstverbrauch registriert wird. Es kann aber auch ohne Unterschied der zu beiden Tarifzeiten eintretende Höchstverbrauch gemessen werden.

Schließlich können auch die Doppeltarifzähler als Spitzenzähler benutzt werden. Es geschieht die Registrierung alsdann in der Weise, daß z. B. während des niedrigen Tarifes die unter einer bestimmten Pauschalgrenze verbrauchte Energie überhaupt nicht registriert wird, sondern nur die darüber

liegende. Für die Zeit des hohen Tarifes wird in diesem Falle der Einfluß der Gegenrollen und Gegenpendel durch Unterbrechung dieses Stromkreises beseitigt, so daß jetzt die gesamte Energie während des hohen Tarifes ohne Berücksichtigung der Pauschalgrenze registriert wird.

154. A.E.G. Dopp.-Tar.-Zähler. Das System der elektrischen Betätigung der Umschaltmechanismen bei dem Übergang vom niedrigen zum hohen Tarif wird von der A.E.G. angewendet. Die Umschaltung des Zählers erfolgt hierbei durch eine besondere mechanisch angetriebene und mit dem Zähler nur durch zwei dünne Span-



Fig. 170.

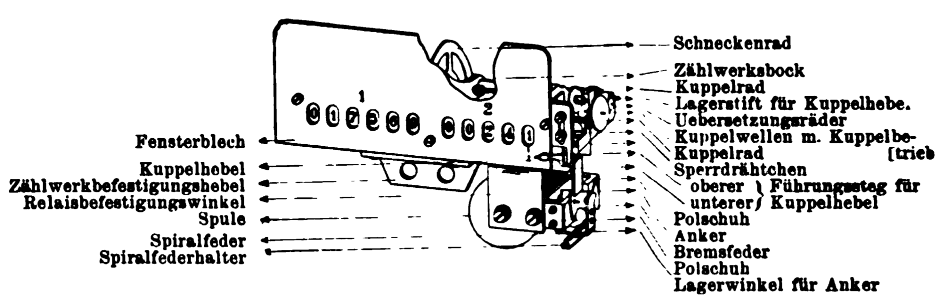
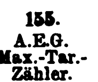


Fig. 171.

nungsleitungen verbundene Pendeluhr zu zwei Zeitpunkten, die an der Uhr von außen mechanisch einstellbar sind. Fig. 170 stellt diese Umschaltuhr in geöffnetem Zustande, Fig. 171 das in solchem Falle in den betreffenden Zähler eingebaute Doppelzählwerk in perspektivischer Ansicht, Fig. 172 schließlich einen mit diesem Doppelzählwerk ausgerüsteten A.E.G.-Gleichstromzähler Type *LR* dar. Bei diesem Doppelzählwerk wird von der Zählerachse eine an einem Ende etwas verschiebbar gelagerte Triebwelle, welche den Umschalttrieb trägt, durch einen Elektromagnetanker beeinflußt, siehe Fig. 171, und das eine Mal mit dem auf das Zählwerk für niedrigen Tarif einwirkenden Triebe, das andere Mal mit einem anderen Rade verbunden, welches das Zählwerk für hohen Tarif in Bewegung setzt. Der von der Spannung betätigte Elektromagnet wirkt mit seinen entsprechend geformten Polschuhen auf den an einem Ende drehbar gelagerten Anker ein, der durch eine Feder bei nichterregtem Magneten von demselben abgezogen wird und hierdurch das Zählwerk mit niedrigem Tarif einkuppelt. Bei Eintritt der Zeit hohen Tarifes

erfolgt Stromschluß an der Kontaktuhr, der Elektromagnet zieht den Anker entgegen der Wirkung der Feder an und kuppelt hierdurch den Umschalttrieb durch ein Zahnrad mit dem Zählwerk für hohen Tarif. In beiden Fällen wird das nicht eingeschaltete Zählwerk mechanisch gesperrt. Ein sich bei dieser Umschaltung gleichzeitig verstellender Zeiger gibt, wie aus Fig. 171 ersichtlich ist, durch seine jeweilige Stellung an, ob Zählwerk 1 oder 2, für hohen oder niederen Tarif eingeschaltet ist.


155. A.E.G. Max.-Tar.-Zähler.

Den an einigen Stellen gewünschten Maximaltarif berücksichtigt die A.E.G. durch eine Kombination eines ihrer gewöhnlichen Zähler mit einem mechanisch betätigten Maximalzeiger. Das Zählwerk des betr. Apparates ist wie bei den gewöhnlichen Zählern ausgeführt, und können an dem Fenster ebenso die verbrauchten Wattstunden wie bei jedem anderen Zähler abge-



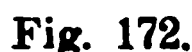

Fig. 172.


Fig. 173.

lesen werden. Die Übersetzungswelle des Zählwerkes betätigt jedoch unter Vermittelung entsprechender Übersetzungsräder ein Triebrad und bringt es zur andauernden Rotation. Mit demselben ist fest der Mitnehmer des Maximalzeigers verbunden, sowie das innere Ende einer Spiralfeder, durch welches das Zahnrad und der Mitnehmer nach Unterbrechung des Eingriffes zwischen Trieb und Zahnrad in ihre Anfangslage zurückgeführt werden. Der Mitnehmer ist nun lediglich während bestimmter Perioden mit dem von der Zählwerksachse angetriebenen Zahnrad gekuppelt und wird infolgedessen während dieser Zeitdauer um einen bestimmten Betrag vorwärts geschoben. Diese Drehung, als Ausschlag des Maximalzeigers ablesbar, wird um so größer ausfallen, je schneller der Zähler rotiert, d. h. je stärker er belastet, je größer die Stromentnahme ist. Ist die Belastung während der nächsten Periode der Kuppelung zwischen Mitnehmer und Zählwerksachse eine größere, so wird der Maximalzeiger noch weiter geschoben. Andernfalls erreicht der Mitnehmer die Stelle des Maximalzeigers nicht und bleibt ohne Einwirkung auf ihn. Die Stellung des Maximalzeigers ist daher in jedem Falle ein Maß der zwischen zwei Ablesungen stattgehabten Maximalstromentnahme. Fig. 173 stellt einen mit solchem Maximalzeiger ausgerüsteten Gleichstromzähler, Type *LR* der A.E.G. dar.

156. Siemens-Schuckert Dopp.-Tar.-Systeme.

Die Siemens-Schuckert Werke, Berlin, stellen ebenfalls Doppeltarifzähler her, doch stets in getrennter Anordnung von Umschaltuhr und Zähler und mit elektrischer Betätigung der Umschaltung. Die Umschaltuhr, eine genaue Pendeluhr, wird entweder mit mechanischem Aufzug, der mindestens alle 4 Wochen vorzunehmen ist, oder mit elektrischem Selbstaufzug geliefert, der durch einen von der Spannung erregten Elektromagneten betätigt wird. Fig. 174 zeigt Modell PH, eine solche Uhr mit mechanischem Aufzug, Fig. 175 Modell P für elektrischen. Um die Einführung des Doppeltarifes durch Mitbenutzung der in den Zentralen bereits vorhandenen Einfachtarifzähler zu erleichtern, dient das in Fig. 174 abgebildete Modell PH, welches ein besonderes Zählwerk besitzt. Es wird in diesem Falle an dem Zählwerk des Einfachtarifzählers eine Kontaktvorrichtung angebracht, welche dieses zweite Zählwerk in der Umschaltuhr fortschaltet. Dies erfolgt jedoch nur in einer der Tarifperioden, des niederen oder hohen Tarifes, und sind





Fig. 174.



Fig. 175.

infolgedessen die Angaben des anderen Tarifes in der Differenz der Angaben der gesamten verbrauchten Energie an dem Einfachtarifzähler ablesbar, und des Verbrauches während der einen Tarifperiode, an dem Zählwerk in der Umschaltuhr ablesbar, angegeben. Mit dieser besonderen Kontaktvorrichtung werden bestimmte heutige Zähler der Firma ausgerüstet, ältere Zähler können nach vorheriger Einsendung auf Wunsch entsprechend umgeändert werden. Wo Doppeltarifzähler neu installiert werden, kommen hierfür besondere Konstruktionen zur Anwendung, wie eine solche aus Fig. 176 in der äußeren Ausführung zu ersehen ist. Der betr. Gleich- oder Wechselstromzähler erhält ein doppeltes Zählwerk, welches durch einen von der Umschaltuhr gesteuerten Elektromagneten umgeschaltet wird.

157. Siemens-Schuckert Max.-Tar.-Zähler.

Für das in einigen Fällen gewünschte Höchstverbrauchsystem kommt eine den bereits beschriebenen Konstruktionen ähnliche, wie in Fig. 177 abgebildet, zur Anwendung. Zu diesem Zweck ist in dem betr. Zähler außer dem normalen die gesamte Zahl der verbrauchten Kilowattstunden anzeigenden Zählwerk noch ein zweites vorhanden, welches den vor einer kreisförmigen Skala sich mit Friktion bewegenden Maximalzeiger antreibt. Dieses zweite

Zählwerk wird zur Vermeidung irgend welcher Unsicherheit, wie dieselbe elektrischen Kontakten anhaftet, direkt mechanisch von dem Hauptzählwerk des Zählers angetrieben, seine periodische Kuppelung und Entkuppelung mit dem Maximalzeiger erfolgt jedoch elektrisch durch die besondere Umschaltuhr, was alle 15 Minuten eintritt. Die Kuppelung wird durch ein Relais, die Entkuppelung durch eine Feder bewirkt, und wird das hierzu benutzte Relais zur Vermeidung besonderen Eigenverbrauches in Reihe mit der Spannungsspule des Zählers erregt. Die Ausschaltung des Relais, so daß es die Kuppelung losläßt, erfolgt dann durch Kurzschluß an seinen Klemmen.





Fig. 176.



Fig. 177.

Der Maximalzeiger selbst ist durch einen von außen drehbaren und durchbohrten Metallkopf, der durch einen plombierbaren dicht schließenden Metallstöpsel verschließbar ist, von außen auf Null zurückzuführen. Die das Relais kurzschließende Uhr mit Handaufzug kann mit einem zweiten Kontakt und Zeitscheibe mit Stellzeigern versehen werden, durch welche der Maximalzeiger während beliebig einstellbarer Zeit entkuppelt werden kann. Es ist hierdurch die Möglichkeit gegeben, die Maxima nur zu bestimmten Tageszeiten zu registrieren (Maximumzeiger mit beschränkter Registrierperiode). Es ist dies ein Vorteil vor ähnlichen Konstruktionen, indem hierdurch der dem Maximalverbrauchssystem mit Recht gemachte Vorwurf, daß das diesem System zugrunde liegende Berechnungsprinzip nur dann gerecht ist, falls die Feststellung des maximalen Verbrauches während der Perioden der Maximal-

belastung der Zentrale vorgenommen wird, hierdurch entkräftet bzw. gebührend berücksichtigt wird. Im Falle die Registrierzeiten nicht beschränkt werden, fallen natürlich Zeitscheibe mit Stellzeiger und zugehörigem Kontakt fort. Die Uhr erhält dann nur den einen Kontakt, der das Höchstverbrauchzählwerk periodisch von der Ankerachse des Zählers abkuppelt.

158. Dopp.-Tar.-Zähler von A. G. Mix & Genest.

Im Gegensatz zu den beiden letzten Konstruktionen eines Doppeltarifzählers hat die Firma A. G. Mix & Genest, Berlin, für den ihrigen eine rein mechanische Betätigung gewählt. Es sind hierbei die beiden Zählwerke mit der Uhr und dem Umschaltmechanismus zu einem abgeschlossenen Ganzen fest verbunden, wie dies Fig. 178 erkennen läßt, und ermöglicht dies, jeden beliebigen Normalzähler mit diesem Doppeltarifzählwerk zu versehen. Die Uhr, ein Werk mit 45-tägiger Gangdauer mit Zylinderechappement, bewirkt die Umschaltung des Zählwerkes mechanisch und zwar momentan. Wie aus den Fig. 178 und 179 hervorgeht, welch letztere den Zusammenbau



Fig. 178.



Fig. 179.

von Zähler und Doppeltarifschaltwerk zeigt, befinden sich vorn oben an dem Zähler zwei nebeneinander angeordnete Zifferblätter mit Einteilung in 12 Nacht- und 12 Tagstunden. Vor jedem derselben befindet sich ein durch einen Knopf verstellbarer Zeiger. Entsprechend der unter diesen Zifferblättern angebrachten Aufschrift wird der linke Zeiger auf den Anfang, der rechte auf die Endzeit des hohen Tarifes eingestellt, und zwar kann man bei diesem Apparat die Einstellung auf Viertelstunden genau vornehmen. Der nicht vorhandene Stundenzeiger wird durch den zwischen beiden Zifferblättern befindlichen Pfeil ersetzt, durch welchen man die jeweils vorhandene Tageszeit ablesen kann. Links darunter befindet sich ein besonderer Minutenzeiger, rechts davon der Aufzug für das Uhrwerk. In der Mitte unten zwischen beiden Zählwerken ist das Echappement sichtbar, um jederzeit den Gang der Uhr erkennen zu können. Der Gang des Zählers selbst wird wie üblich an der rotierenden Bremsscheibe beobachtet, die in einem Ausschnitt im höchsten Teile des Zählers sichtbar ist.

159. Danubia-Dopp.-Tar.-Zähler.

Der in seiner äußeren Ausführung in Fig. 180 wiedergegebene Doppeltarifzähler der Danubia A.-G., Straßburg, besitzt zwei konzentrische Zifferblätter, zwischen welchen sich die zur Einstellung der Tarifzeiten dienenden Zeiger verschieben lassen. Die Umschaltung wird durch eine Ankerunruheuhr bewirkt. Das äußere Zifferblatt steht fest, während das innere, welches auch mit dem Zeiger fest verbunden ist, in 24 Stunden eine Umdrehung macht. Die Einstellung der Zeit, innerhalb welcher die Tarifänderung vorgehen soll, geschieht durch entsprechende Verschiebung der

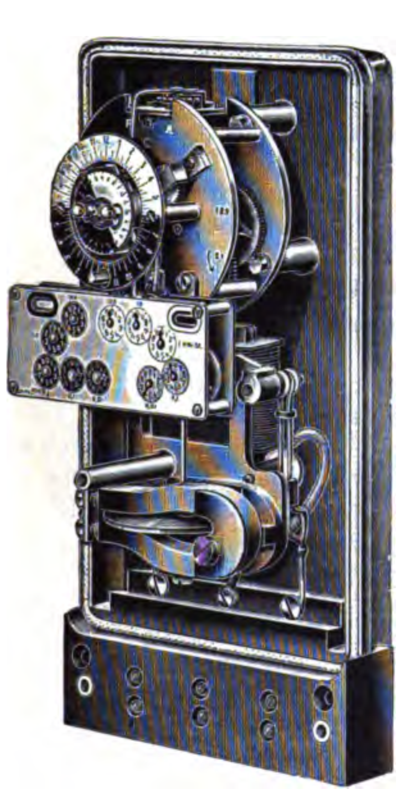


Fig. 180.

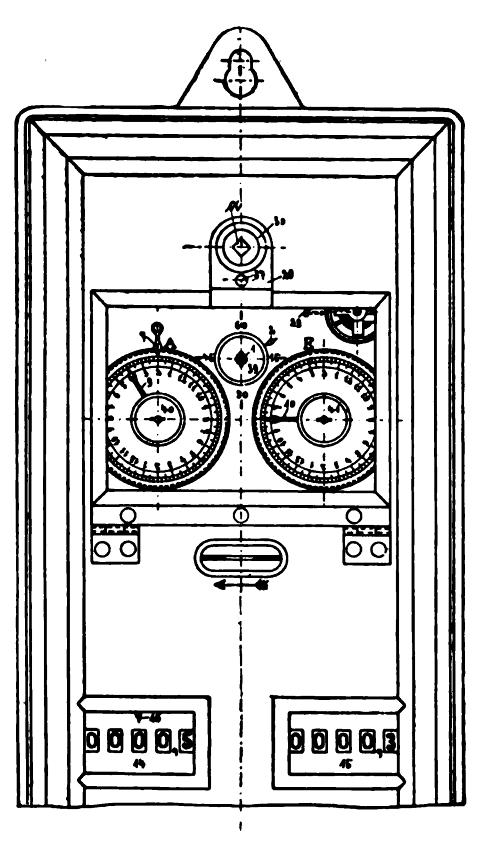


Fig. 181.

beiden Umschaltarme, und zwar wird der mit den Buchstaben H. T. (Höherer Tarif) bezeichnete Arm mit der Kerbe auf diejenige Stunde des Zifferblattes eingestellt, zu welcher der höhere Tarif beginnen soll, während der entsprechend mit N. T. gekennzeichnete Arm auf die Anfangszeit des niederen Tarifes eingestellt wird. Beide Zifferblätter sind wie üblich in zwei helle und dunkle Hälften eingeteilt, wobei die helle von 6 Uhr früh bis 6 Uhr abends gilt. Ein Pfeil zwischen beiden Doppeltarif-Zifferblättern gibt stets an, welches von beiden eingeschaltet ist. Das Doppelzählwerk wird je nach Wunsch mit springenden Ziffern oder schleichenden Zeigern ausgerüstet. Der gewählte enge mechanische Zusammenbau zwischen Umschaltmechanismus, Doppeltarif-Zählwerken und dem Zähler selbst macht alle Nebenapparate entbehrlich, ebenso wie die mechanische Umschaltung durch Fortfall jedes

elektrischen Kontaktes die Sicherheit erhöht. Behandlung und Einstellung sind äußerst einfach vorzunehmen.

160. Dopp.-Tar.-Zähl. der Felt. & Guill.-Lahm.-W.

Die gleiche enge Verbindung findet sich bei dem Doppeltarifzähler der Felten & Guilleaume-Lahmeyer-Werke, Frankfurt a. M. Auch hier wird der Zähler mit einem 45tägigen Uhrwerk und dem Doppeltarif-Zählwerk auf einer Metallplatte vereinigt, wobei die Kuppelung mechanisch durch die Uhr ausgeführt wird. Wie aus Fig. 181 ersichtlich ist, werden die Tarifzeiten an zwei getrennten Zifferblättern eingestellt, und der Verbrauch während des hohen und niederen Tarifes getrennt an den beiden unteren mit springenden Zahlen ausgerüsteten Zifferblättern registriert.

Von der Zählerachse wird mittelst Schnecke und Zählwerksübersetzung das Zahnrad 11 angetrieben, s. Fig. 182, mit welchem die beiden Triebe 12 und 13 fest auf der gleichen Achse, aber um einen Punkt 6 drehbar befestigt sind. Diese Triebe übertragen die Zählerumdrehungen auf die beiden Zählwerke 14, 15, je nachdem die Uhr durch ihr Hebelwerk Trieb 12 oder 13 zur Kuppelung mit den entsprechenden Antriebsrädern der Zählwerke bringt. Der leichteren Erkennbarkeit von außen wegen, welcher Tarif jeweilig in Kraft ist, erscheint eine rote Marke 16 über dem betr. eingeschalteten Zählwerk.

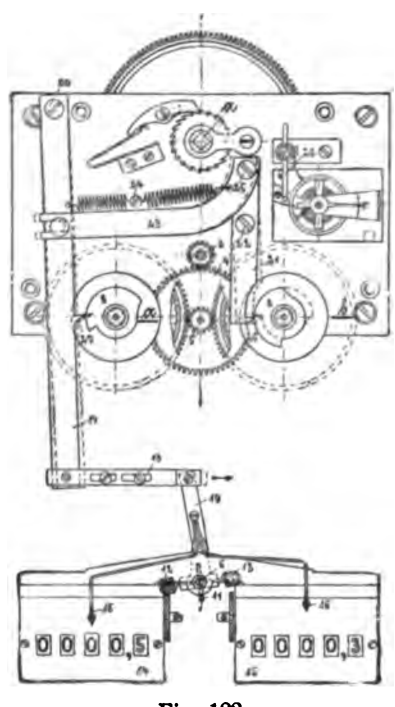


Fig. 182.

Die Übertragung geschieht durch ein kräftig ausgebildetes Hebelwerk und besteht aus einem starken Hebel 17 mit seinen Gliedern 18 und 19, der um den Punkt 20 drehbar ist, und einem zweiten sich um den Punkt 22 drehenden Hebel 21. Beide Hebel sind durch die Brücke 23 einseitig zwangläufig miteinander verbunden, welche durch eine starke Feder nach dem festen Punkt 24 gezogen wird und durch ihren Drehpunkt 25 die Nase 26 des Hebels 21 gegen die Stufenscheibe 8 drückt. Hebel 17 wird durch eine etwas schwächere Feder gegen Punkt 24 gezogen, so daß seine Nase 27 gegen das Stufenrad 8 gedrückt, und dadurch das Zählwerk 15 gekuppelt wird, sobald sie in den Zahn der Stufenscheibe fällt. Ist dagegen Nase 26 in den Zahn ihrer betr. Stufenscheibe gekommen, so wird durch Brücke 23 der Hebel 17 verhindert, mit seiner Nase 27 in das Stufenrad einzufallen und kann daher während dieser Periode nur das Zählwerk 14 eingeschaltet sein.

Dringt daher Nase 27 in ihren Stufenzeiger ein, so wird Zählwerk 15, die Registrierung nach dem hohen Tarif, so lange eingeschaltet bleiben, bis die Nase 26 in ihre Stufenscheibe eindringt und das normale Zählwerk, d. h. dasjenige des niederen Tarifes wieder kuppelt. Die Tarifzeiten sind daher einstellbar durch die Zähne der Stufenscheibe und der mit dieser fest verbundenen Zeiger 9 und 10, und zwar wird die Anzeige zu der Zeit beginnen, welche durch den Zeiger 9 am linken Stundenrad eingestellt ist und

zu der Zeit enden, welche durch den Zeiger am rechten Stundenrad markiert wird. Es ist jedoch außerdem möglich, die Uhr in tariffreien Zeiten ganz abzustellen, nämlich durch eine Bewegung des Hebels 28 nach rechts, wodurch das Echappement der Uhr mittelst einer zarten Feder an der Bewegung gehindert wird. Um zur Uhr zu gelangen, läßt sich das Fenster mittelst des daran befindlichen Schraubenkopfes öffnen.

Die Uhr ist einstellbar durch Drehen an dem Kopf 39 des Minutenzählwerkes, s. Fig. 183. Der Anfang der Tarifzeit läßt sich am linken Stundenrad *A* durch Drehen des Zeigers 9 mittelst des Kopfes 40, das Ende derselben durch Drehen des Zeigers 10 mittelst des Kopfes 41 am rechten Stundenrade *E* auf die bestimmte Stunde einstellen. In Fig. 181 zeigt die Uhr 2 Uhr 10 Min. an, und ist die Tarifzeit von 4 bis 8 Uhr eingestellt. Die Drehung soll nur nach rechts im Sinne der Uhrzeigerbewegung stattfinden, und drehen sich deshalb die Köpfe 40 und 41 nach links leer, d. h. ohne ihre Zeiger 9 und 10 mitzunehmen, um die Uhr vor Beschädigung zu schützen.

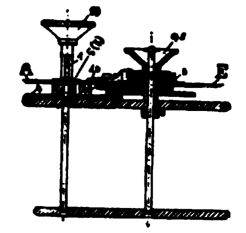


Fig. 183.

161. Isaria-Dopp.-Tar.-Zähl.

Auch die Isaria Zählerwerke, G. m. b. H., München, stellen einen durchaus mechanisch arbeitenden Doppeltarifzähler her bei welchem Zähler und Umschaltuhr in sehr gedrängter Form miteinander mechanisch vereinigt sind. Aus Gründen der größeren Unabhängigkeit von genau senkrechter Aufhängung gibt die Firma der Verwendung einer Uhr mit Zylinder- oder Ankerechappement vor derjenigen einer Pendeluhr den Vorzug.

162. Dopp.-Tar.-Zähl. von Landis & Gyr.

Die Firma Landis & Gyr läßt im Gegensatz hierzu die einer Pendeluhr innewohnende größere Regulierfähigkeit für ihre Benutzung bei ihrem Doppeltarifzähler den Aufschlag geben. Das für eine 45tägige Gangdauer berechnete Präzisionspendeluhrwerk verbürgt eine sehr genaue Umschaltung des Zählers zu der vereinbarten Zeit, was in diesem Falle um so mehr nötig ist, als der Doppeltarifzähler gleichzeitig den Dienst einer guten Präzisionswanduhr versieht, der Abonnent somit leicht in der Lage ist, festzustellen, ob die Umschaltung auch genau zu den betr. Zeitpunkten erfolgt. Die Uhr ist mit dem Zähler auf gemeinsamer Grundplatte montiert und bewirkt die Umschaltung der beiden als Zeigerwerke ausgebildeten Zählwerke rein mechanisch, um jede aus elektrischen Kontakten zu befürchtende Unsicherheit zu vermeiden. Für diesen Doppeltarifzähler können alle gewöhnlichen Zähler der Firma, für Gleich-, Einphasen- und Mehrphasen-Strom benutzt werden. Die Umschaltung selbst geschieht durch eine in das Zifferblatt der Uhr eingelassene und mit einer Stundeneinteilung von 24 Abschnitten versehene Zeitscheibe, die, wie üblich halb weiß und halb schwarz ausgeführt, in 24 Stunden eine Umdrehung macht. Der Tarifwechsel selbst erfolgt mittelst in diese Scheibe einzuschraubender Stifte und kann zu beliebiger Zeit, in halbstündigen Intervallen sowie während eines Tages mehrfach vorgenommen werden. Der Zähler wird für Gleichstrom bis 600 Amp. und für beliebige Spannungen, für Einphasen- und Wechselstrom für alle Spannungen und Stromstärken ausgeführt, indem für höhere Spannungen und Stromstärken entsprechende Strom- und Spannungstransformatoren zur Benutzung kommen. Fig. 184 und 185 stellen den Zähler in offenem und geschlossenem Zustande dar.

[illegible] die Erzeugung [illegible] Bereich [illegible] Heft 35. [illegible]







auch in Friedenau eingeführten Tarife die Berechnung der Stromkosten auf folgende Weise:

„Die Elektrizitätszähler bestehen aus Wattstunden- und Zeitzählern. Der KWSt.-Zähler vermerkt die verbrauchten KWSt., der Zeitzähler diejenigen Zeitstunden, während welcher mindestens die Hälfte der im täglichen Gebrauche regelmäßig wiederkehrenden Höchstzahl von Lampen oder PS. in Benutzung tritt.“

Hierfür benötigt ein gewöhnlicher mechanischer Zeitzähler ein besonderes Relais zu seiner Einschaltung. Benutzt man bei diesem Relais zur Erhöhung der Empfindlichkeit Eisen, so ist mit der Wirkung der Hysteresis zu rechnen, bei zu- und abnehmender Belastung erfolgt die Betätigung des Zeitzählers

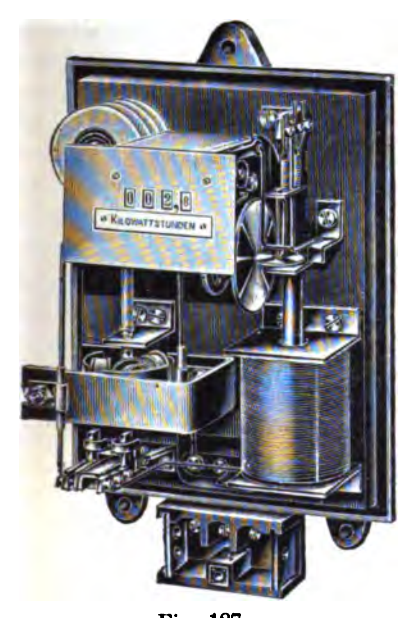


Fig. 187.



Fig. 188.

nicht bei der gleichen Stromstärke. Ein ohne Eisen arbeitendes Relais fällt zufolge der geringen Kraft eisenloser Spulen umfangreich und kostspielig aus. Hier bringt der motorisch betriebene Zeitzähler den Vorteil mit sich, daß zu seiner Betätigung keine mechanische Auslösung, sondern bei Nebenschlußschaltung des Zeitzählers nur die Herstellung des Kontaktes in einem nur wenige Milliampere führenden Stromkreise nötig ist. Hierfür läßt sich dann auch ein eisenloses Relais leicht und einfach ausführen.

164. Spitzenzähler des Schierst. Met.-W.

Neuerdings hat die Firma einen Spitzenzähler konstruiert, der bei einfacher Konstruktion in gleicher Weise wie der vorbeschriebene ARON'sche Zähler den grundsätzlichen Nachteilen des Pauschalsystemes gegenüber Abhilfe bringen soll — s. WAGMUELLER: „Vereinfachung der Stromabgabe-Verrechnung und Beschreibung eines einfachen Zählers hierfür“, ETZ. 1907, Heft 32. — Zu diesem Zweck, s. Fig. 187 und 188, wird durch einen von der Spannung erregten kleinen Gleichstrommotor, aus dem dreiteiligen Eisenanker des Schiersteiner Metallwerkes, s. Fig. 69, und einem permanenten Magneten als Feldsystem bestehend, eine auf den Pendelgesetzen beruhende Gangregelung in Tätigkeit gesetzt und hierdurch ein konstanter

Umlauf der aus Fig. 187 ersichtlichen vertikalen Aluminiumscheibe herbeigeführt. Gegen diese Aluminiumscheibe wird mit gelinder Reibung ein kleines Meßrädchen von der bei Planimetern üblichen Form gedrückt, welches in geeigneter Weise an einem von dem unteren Solenoid beeinflußten Eisenkern angebracht ist. Dieser Eisenkern mitsamt dem Meßrädchen wird durch eine entsprechend angespannte Feder nach oben gezogen und durch einen Anschlag in solcher Höhe festgehalten, daß das Meßrädchen die Aluminiumscheibe gerade in ihrem Mittelpunkt berührt, d. h. in dieser Stellung von der Bewegung der Scheibe unbeeinflußt bleibt. Die Bewegung des Meßrädchens wird mit Hilfe einer geeigneten Übersetzung direkt auf das Zählwerk übertragen.

Die vorgespannte Feder hält nun den Eisenkern entgegen der anziehenden Wirkung des Solenoides in dieser Nullage fest bis zu einer bestimmten durch

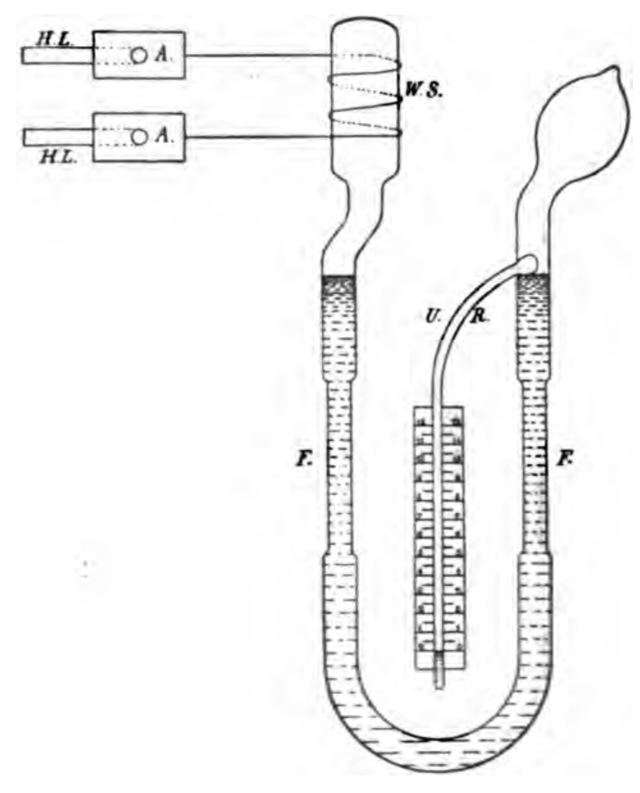


Fig. 189.

die Pauschalgrenze festgesetzten Stromstärke. Bis zu dieser Belastung bleibt daher das Meßrädchen in Ruhe und ebenso das Zählwerk des Apparates. Nach Überschreitung der Pauschalgrenze zieht die Solenoidwickelung den Eisenkern mehr und mehr in ihre Höhlung hinein und bringt hierdurch das Meßrädchen näher an den Umfang der Scheibe. Im gleichen Maße nimmt daher das Rädchen eine mehr und mehr wachsende Geschwindigkeit an und überträgt dieselbe auf das Zählwerk. Um dafür zu sorgen, daß das Meßrädchen bei Belastungsschwankungen genügend schnell unbeeinflußt durch Reibung die der betr. Stromstärke entsprechende Stellung einnehmen kann, wird die Aluminiumscheibe durch eine besondere mechanisch wirkende Er-

schütterungsvorrichtung in bestimmten Zeiträumen eine kurze Strecke seitwärts verschoben, hierbei das Meßrädchen vollkommen frei gebend, um dasselbe sich während dieser Zeit ganz genau einstellen zu lassen. Die für Erzielung von Proportionalität zwischen Stromstärke und Einziehung des Eisenkernes erforderliche Gegenkraft wird durch Anwendung mehrerer Zugfedern auf den richtigen Betrag eingestellt.

165. Wrights Höchstverbrauchsmesser.

Wenngleich der von Wright selbst zur Durchführung seines Maximaltarifes ersonnene elektrothermische Höchstverbrauchsanzeiger bezüglich Einfachheit wenig oder nichts zu wünschen übrig läßt, so haben sich seiner Einführung, namentlich auf dem Kontinente, große Schwierigkeiten entgegengestellt, die zum großen Teile berechtigten Bedenken hinsichtlich seiner primitiven und ungenauen Wirkungsweise entspringen. Gemäß der schematischen Darstellung von Fig. 189 besteht dieser Wrightsche Höchstverbrauchsmesser aus einer U-förmigen Glasröhre, die an ihren beiden Enden mit zweckentsprechenden Ausbauchungen versehen ist und an der einen Seite ein Ansatzrohr trägt, das über einer Skala verlaufende Meßrohr. Der Verbrauchsstrom durchfließt die um das eine erweiterte Ende gelegte Spirale aus Platinoid oder einem anderen Widerstandsmaterial und erwärmt hierdurch die im Innern der Glasröhre an diesem Ende befindliche Luft. Da die U-förmige Röhre bis zu der angegebenen Höhe mit einer schwach gefärbten Flüssigkeit angefüllt ist, so bewirkt die Erwärmung der Luft ein Anwachsen des Druckes auf die Flüssigkeit an diesem Ende und ein Ansteigen derselben im anderen. Da nun das Ansatzrohr in solcher Höhe eingeschmolzen ist, in welcher bei offenem Strome der Flüssigkeitsspiegel in diesem Teile der Röhre gerade eben an dies Überfallrohr heranreicht, so wird bei beginnender Erwärmung des anderen Endes die in diesem Teile steigende Flüssigkeit in das Meßrohr überlaufen und zwar umsomehr, je höher die Stromstärke und damit die vom Strome ausgeübte Erwärmung ist. Geht die Stromstärke von einem gewissen Betrage zurück, so nähert sich die Flüssigkeitssäule in beiden Schenkeln wieder ihrer normalen Lage. Der in das Meßrohr übergeflossene Teil bleibt aber natürlich in demselben zurück und gibt hierdurch ein Maß der höchsten bisher vorhanden gewesenen Stromstärke. Um neue Flüssigkeit in das Meßrohr zu überführen, muß daher die Stromstärke den bisher erreichten Höchstwert übersteigen. Wie aus der die



Fig. 190 a. Fig. 190 b.

Gesamtausführung dieses Höchstverbrauchsmessers darstellenden Fig. 190a und b zu ersehen ist, wird der Apparat nach Öffnung in ähnlicher Weise wie der WRIGHT'sche elektrolytische Zähler selbst durch Emporschwingen und dadurch bewirktes Auslaufen der Flüssigkeit aus dem Meßrohr in seinen Anfangszustand zurückgeführt.

Der durch die Abwesenheit aller beweglichen Teile nicht zu überbietenden Einfachheit stehen jedoch die gewichtigen Bedenken gegenüber, daß der Apparat von der Temperatur seiner Umgebung und von zufällig in seiner Nähe stattfindenden Temperaturschwankungen sehr abhängig ist. Es ist infolgedessen auch leicht, ihn in betrügerischer Absicht so zu beeinflussen, daß er den tatsächlich stattgefundenen Höchstverbrauch nicht anzeigt. Schließlich folgt der Apparat den Stromschwankungen nur mit einer gewissen Zeitnacheilung, was in manchen Fällen ebenfalls zu größeren Fehlern Veranlassung geben kann. Aus diesem Grunde ist seine größere Verbreitung wenig wahrscheinlich. Zur großen Ausbreitung des WRIGHT'schen Systemes in England selbst hat jedoch seine große Einfachheit zweifellos erheblich beigetragen.

V.

Gesetz, betreffend die elektrischen Mafseinheiten

vom 1. Juni 1898.

---

§ 1. Die gesetzlichen Einheiten für elektrische Messungen sind das Ohm, das Ampere und das Volt.

§ 2. Das Ohm ist die Einheit des elektrischen Widerstandes. Es wird dargestellt durch den Widerstand einer Quecksilbersäule von der Temperatur des schmelzenden Eises, deren Länge bei durchweg gleichem, einem Quadratmillimeter gleich zu achtenden Querschnitt 106·3 Zentimeter und deren Masse 14·4521 Gramm beträgt.

§ 3. Das Ampere ist die Einheit der elektrischen Stromstärke. Es wird dargestellt durch den unveränderlichen elektrischen Strom, welcher bei dem Durchgange durch eine wässerige Lösung von Silbernitrat in einer Sekunde 0·001118 Gramm Silber niederschlägt.

§ 4. Das Volt ist die Einheit der elektromotorischen Kraft. Es wird dargestellt durch die elektromotorische Kraft, welche in einem Leiter, dessen Widerstand ein Ohm beträgt, einen elektrischen Strom von einem Ampere erzeugt.

§ 5. Der Bundesrat ist ermächtigt,

a) die Bedingungen festzusetzen, bei denen bei Darstellung des Ampere (§ 3) die Abscheidung des Silbers stattzufinden hat,
b) Bezeichnungen für die Einheiten der Elektrizitätsmenge, der elektrischen Arbeit und Leistung, der elektrischen Kapazität und der elektrischen Induktion festzusetzen,
c) Bezeichnungen für die Vielfachen und Teile der elektrischen Einheiten (§§ 1, 5 b) vorzuschreiben,
d) zu bestimmen, in welcher Weise die Stärke, die elektromotorische Kraft, die Arbeit und Leistung der Wechselströme zu berechnen ist.

§ 6. Bei der gewerbsmäßigen Abgabe elektrischer Arbeit dürfen Meßwerkzeuge, sofern sie nach den Lieferungsbedingungen zur Bestimmung der Vergütung dienen sollen, nur verwendet werden, wenn ihre Angaben auf den gesetzlichen Einheiten beruhen. Der Gebrauch unrichtiger Meßgeräte ist verboten. Der Bundesrat hat nach Anhörung der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt die äußersten Grenzen der zu duldenden Abweichungen von der Richtigkeit festzusetzen.

Der Bundesrat ist ermächtigt, Vorschriften darüber zu erlassen, inwieweit die im Absatz 1 bezeichneten Meßwerkzeuge amtlich beglaubigt oder einer wiederkehrenden amtlichen Überwachung unterworfen sein sollen.

§ 7. Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt hat Quecksilbernormale des Ohm herzustellen und für deren Kontrolle und sichere Aufbewahrung an verschiedenen Orten zu sorgen. Der Widerstandswert von Normalen aus festen Metallen, welche zu den Beglaubigungsarbeiten dienen, ist durch alljährlich zu wiederholende Vergleichungen mit den Quecksilbernormalen sicher zu stellen.

§ 8. Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt hat für die Ausgabe amtlich beglaubigter Widerstände und galvanischer Normalelemente zur Ermittelung der Stromstärke und Spannungen Sorge zu tragen.

§ 9. Die amtliche Prüfung und Beglaubigung elektrischer Meßgeräte erfolgt durch die Physikalisch-Technische Reichsanstalt. Der Reichskanzler kann die Befugnis hierzu auch anderen Stellen übertragen. Alle zur Ausführung der amtlichen Prüfung benutzten Normale und Normalgeräte müssen durch die Physikalisch-Technische Reichsanstalt beglaubigt sein.

§ 10. Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt hat darüber zu wachen, daß bei der amtlichen Prüfung und Beglaubigung elektrischer Meßgeräte im ganzen Reichsgebiete nach übereinstimmenden Grundsätzen verfahren wird. Sie hat die technische Aufsicht über das Prüfungswesen zu führen und alle darauf bezüglichen technischen Vorschriften zu erlassen. Insbesondere liegt ihr ob, zu bestimmen, welche Arten von Meßgeräten zur amtlichen Beglaubigung zugelassen werden sollen, über Material, sonstige Beschaffenheit und Bezeichnung der Meßgeräte Bestimmungen zu treffen, das bei der Prüfung und Beglaubigung zu beobachtende Verfahren zu regeln, sowie die zu erhebenden Gebühren und das bei den Beglaubigungen anzuwendende Stempelzeichen festzusetzen.

§ 11. Die nach Maßgabe dieses Gesetzes beglaubigten Meßgeräte können im ganzen Umfange des Reiches im Verkehr angewendet werden.

§ 12. Wer bei der gewerbsmäßigen Abgabe elektrischer Arbeit den Bestimmungen im § 6 oder den auf Grund derselben ergehenden Verordnungen zuwiderhandelt, wird mit Geldstrafe bis zu 100 Mark oder mit Haft bis zu 4 Wochen bestraft. Neben der Strafe kann auf Einziehung der vorschriftswidrigen Meßwerkzeuge erkannt werden.

§ 13. Dies Gesetz tritt mit den Bestimmungen in §§ 6 und 12 am 1. Januar 1902, im übrigen am Tage seiner Verkündigung in Kraft.

Namen- und Sachregister.

(Zu Abteilung 6.)

(Die Zahlen bedeuten die seitlichen Artikelnummern.)

Lippert & Co. (G. Pätz'sche Buchdruckerei), Naumburg a. S.

THE NEW YORK PUBLIC LIBRARY
REFERENCE DEPARTMENT

This book is under no circumstances to be
taken from the Building

form 410

JUN 4 1913